

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко

ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою
«Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і
діагностики», «Роботизовані і автоматизовані системи неруйнівного контролю
та діагностики» та «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в
приладобудуванні»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензент

Селіванов, В.Л., к.т.н., доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки факультету інформатики та обчислюваної техніки КПІ ім. Ігоря Сікорського

Єременко, В.С., д.т.н., професор, зав. кафедри інформаційно-вимірювальних технологій приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний

редактор

Богдан, Г.А., к.т.н

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 13.05.2021 р.)
за поданням Вченої ради приладобудівного факультету (протокол № 4/21 від 26.04.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Куц Юрій Васильович, д-р техн. наук, проф.

Лисенко Юлія Юріївна, канд. техн. наук

ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Технології електромагнітного неруйнівного контролю: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 63 с.

У навчальному посібнику з лабораторного практикуму приведено тематику робіт з дисципліни «Технології електромагнітного неруйнівного контролю», стислі теоретичні відомості, формули для розрахунків електрофізичних процесів, послідовність виконання робіт, завдання і пояснення до нього, що включає опрацювання отриманих результатів і оцінювання похибки. Кожна робота супроводжується контрольними запитаннями з метою перевірки засвоєння знань з основних розділів дисципліни, самоконтролю та самостійної роботи. Приведено довідковий матеріал для виконання лабораторних робіт та розуміння процесів розповсюдження електромагнітного поля.

Для студентів та аспірантів вищих навчальних закладів спеціальності «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» та споріднених спеціальностей, а також наукових та інженерно-технічних працівників, фахівців в приладобудуванні та неруйнівному контролі.

© Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
ЗМІСТ І ОБСЯГ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	6
ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО МЕТОДУ ТА ПРИЛАДУ КОНТРОЛЯ ТОВЩИНИ МЕТАЛІЗАЦІЇ ОТВОРІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ НЕМАГНІТНИХ ПОКРИТТІВ НА МАГНІТНІЙ ОСНОВІ.....	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗОВНІШНІХ ПРОХІДНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ...	29
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ МАГНІТНОЇ ПРОНИКЛИВОСТІ.....	37
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ ПРОХІДНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	44
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКЦІЙНОГО СТРУМУ НАКЛАДНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА	54

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ТЕНК – технології електромагнітного неруйнівного контролю

ВСП – вихрострумний перетворювач

ОК – об'єкт контролю

ЕРС – електрорушійна сила

МВС – метод вихрових струмів

ВСТУП

Технології електромагнітного неруйнівного контролю (ТЕНК) ґрунтуються на використанні фізичних явищ магнітного та електричного полів. Створення цих полів, їх взаємодія з об'єктами контролю та реєстрація, аналіз та інтерпретація параметрів полів покладені в основу дисципліни ТЕНК, яка продовжує професійну підготовку бакалаврів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (освітні програми «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики», «Роботизовані і автоматизовані системи неруйнівного контролю та діагностики» та «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»). В сукупності з електрофізичними явищами та ефектами, дана дисципліна охоплює питання конструкції та експлуатації засобів електромагнітного контролю.

Основні завдання лабораторного практикуму з дисципліни ТЕНК полягають у використанні на практиці теоретичних знань, отриманих студентами під час лекційних занять, а також у застосуванні методів розрахунків, що вивчаються в рамках практичних занять. Метою виконання лабораторних робіт є закріплення, поглиблення та систематизування одержаних студентами знань, а також формування вміння проводити інженерні дослідження та розрахунки, формування навичок творчої роботи, опанування загальними та спеціальними методами сучасних наукових досліджень.

Лабораторні роботи з дисципліни ТЕНК спрямовані на вирішення певних фахових завдань у сфері проєктування та розроблення приладів електромагнітного неруйнівного контролю. Під час виконання робіт майбутній фахівець має продемонструвати глибоке розуміння навчального матеріалу отриманого на лекціях з різних дисциплін, технічної інформації викладеної у підручниках, навчальних посібниках та нормативно-технічних джерелах.

Даний навчальний посібник буде корисним студентам під час виконання лабораторних робіт та допоможе своєчасно ознайомити студентів з тематикою робіт, переліком, змістом та обсягом необхідних теоретичних відомостей, етапами виконання лабораторних робіт, правилами оформлення звіту та графічних матеріалів (за необхідності), умовами оцінювання виконаних робіт.

В навчальному посібнику з лабораторного практикуму розглянуто використання різних магнітних, електричних та вихрострумівих перетворювачів,

пристроїв для реєстрації електромагнітного поля за умови його взаємодії з об'єктами контролю та моделювання процесів в об'єктах в умовах дії на них електромагнітного поля, що буде також корисним під час виконання дипломного проєктування.

ЗМІСТ І ОБСЯГ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Зміст лабораторних робіт в рамках відведених годин охоплює основну тематику дисципліни «Технології електромагнітного неруйнівного контролю». Лабораторні роботи базуються на знаннях студентів з таких дисциплін, що надають знання з електроніки, електротехніки, теорії сигналів, контрольно-вимірювальної техніки та пов'язаних з лекційним матеріалом дисципліни ТЕНК. Передбачається виконання студентами кожної з робіт протягом одного заняття, проте деякі з них можуть потребувати додаткового часу на виконання експериментальної частини в залежності від складності завдання на лабораторні дослідження.

За кожною роботою студент готує звіт (формат А4), який містить інформацією про виконавця роботи та її назву (титульний лист), мету роботи, короткі теоретичні відомості та необхідні формули, таблиці для занесення даних, розрахунків та висновки за результатами роботи.

ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

На першому (вступному) занятті студенти розподіляються на підгрупи (в залежності від кількості студентів в групі) та прослуховують курс з питань охорони праці, протипожежної безпеки та правил поведінки в лабораторії. До кожної роботи студент допускається після попередньої співбесіди і за наявності підготовленої форми звіту роботи. Дані, отримані під час виконання роботи, перевіряються і підписуються викладачем. Після опрацювання даних, розрахунків та письмового аналізу результатів експериментальних досліджень, передбачених відповідною лабораторною роботою (висновків по роботі), студент захищає виконану роботу, після чого отримує певну кількість рейтингових балів (згідно додатку до робочої навчальної програми з інформацією про рейтингову систему оцінювання з даної дисципліни).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО МЕТОДУ ТА ПРИЛАДУ КОНТРОЛЯ ТОВЩИНИ МЕТАЛІЗАЦІЇ ОТВОРІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

Мета роботи: дослідження особливостей побудови та принципів роботи апаратури вихрострумowego контролю на прикладі приладу вимірювання товщини металізації отворів друкованих плат, дослідження товщини шару металізації отворів.

Теоретичні відомості

1. Аналіз об'єкту контролю

Для електричного з'єднання провідників на протилежних сторонах друкованих плат, або провідників в різних шарах плати на стінки отворів плати наносять мідне покриття – металізують отвір. Перетин металізованого отвору друкованої плати наведено на рис. 1.1 де позначено: 1 – олов'яно-свинцевий захисний шар, 2 – шар гальванічної міді, 3 – мідна фольга, 4 – склотекстолітова основа.

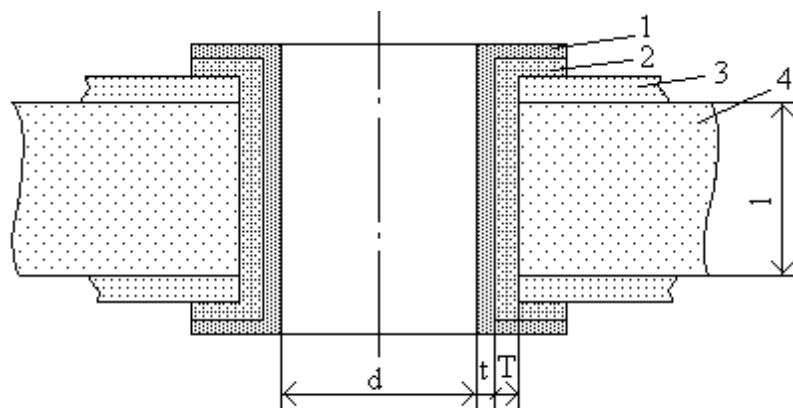


Рис. 1.1. Отвір друкованої плати у розрізі: 1 – олов'яно-свинцевий захисний шар, 2 – шар гальванічної міді, 3 – мідна фольга, 4 – склотекстолітова основа

Найчастіше зазначені на рис. 1.1 параметри мають значення: $d = (0,5 \div 1,5)$ мм, $t = (10 \div 15)$ мкм, $l = (0,5 \div 2)$ мм, $T = (25 \div 50)$ мкм. Питома електропровідність міді у отворі становить $\gamma_m = (44 \pm 2)$ МСм/м. Якщо $T < 25$ мкм, різко зростає імовірність порушення електричного контакту в процесі пайки та подальшої експлуатації. Збільшення товщини T веде до погіршення якості шару міді та

зменшенню діаметру отвору. Отже товщина металізації суттєво впливає на якість друкованих плат.

2. Способи вимірювання товщини шару металізації отворів друкованих плат

Товщину T контролюють руйнівними та неруйнівними методами. Руйнівний метод – метод мікрошліфів – полягає у візуальному дослідженні під мікроскопом осьових розтинів отворів плати. Неруйнівний контроль виконують методами електроопору та вихрострумовим. Перший з названих методів базується на вимірюванні електричного опору ділянки металізації отвору. Схема застосування цього способу наведена на рис. 1.2.

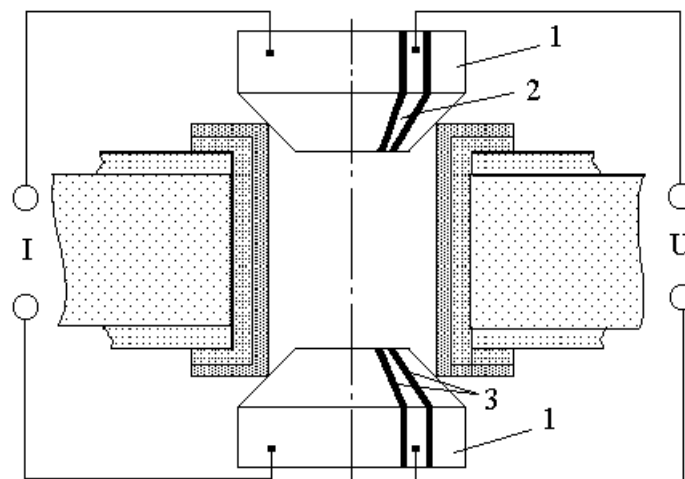


Рис. 1.2. Ілюстрація методу вимірювання електричного опору ділянки металізації отвору: 1 – струмові електроди, 2 – потенційні електроди, 3 – прокладки

Підпружинені електроди 1 самоцентруються у отворах плати і забезпечують рівномірний контакт по всьому колу. Ці електроди своєю більшою частиною (струмовими електродами) підключені до джерела струму, а меншою частиною 2 (потенційними електродами), яка ізольована від струмових електродів прокладками 3 – до вимірювача напруги. Металізація отвору має форму трубки тому її електричний опір становить

$$R = \frac{4 \cdot l}{\gamma_m \cdot \pi \cdot [(d + 2 \cdot T)^2 - d^2]} \approx \frac{l}{\gamma_m \pi \cdot d \cdot T}. \quad (1.1)$$

Вихідна напруга перетворювача за законом Ома дорівнює $U \approx \frac{I \cdot l}{\gamma_m \cdot \pi \cdot d \cdot T}$.

Впливом тонкого шару електрорезисту на опір металізації нехтують, оскільки електропровідність електрорезисту в декілька разів менша ніж у міді. Як правило $R \in (0 - 2000)$ мкОм, а максимальне значення імпульсного струму $I < 80$ мА, тому $U < 0,16$ мВ.

Суттєвими вадами цього метода є: 1) залежність результатів вимірювання від опору сусідніх металізованих отворів що ввімкнені паралельно з досліджуванним, 2) нелінійна характеристика градування, 3) необхідність двостороннього доступу до плати, 4) значний вплив контактних площадок та якості контакту на похибку вимірювання.

3. Фізичні основи вихрострумowego способу вимірювання товщини металізації

Суть вихрострумowego метода полягає у наступному. Невелику за розмірами котушку індуктивності розміщують у отворі друкованої плати. За допомогою цієї котушки – котушки збудження, створюється електромагнітне поле збудження, яке діє на металізацію отвору і породжує в ній вихрові струми. Щільність вихрових струмів залежить від товщини шару металізації та багатьох інших факторів – електропровідності, зазору між вихрострумовим перетворювачем (ВСП) та стінками отвору, діаметру отвору, розмірів ВСП, якості поверхні отвору, наявності дефектів (тріщин, порожнин) і т.і. Вихрові струми збуджують своє електромагнітне поле, яке діє на допоміжну вимірювальну (або ту ж саму) електричну котушку, змінюючи її вихідну напругу (або опір). Отже вихідним сигналом ВСП є вихідна напруга (або опір). Оскільки вихідні сигнали характеризуються тільки двома параметрами – амплітудою та фазовим зсувом (або активним та індуктивним опорами), що значно менше кількості впливаючих факторів, це створює певні труднощі для тлумачення результатів вимірювань. Як правило, вплив деяких перешкоджаючих факторів заглушують або зменшують за рахунок використання одного з відомих способів (амплітудного, фазового, амплітудно-фазового, частотного), а решту перешкоджаючих факторів вважають незмінними в ході експерименту або стабілізують.

Вихідна напруга ВСП, представлена в комплексній формі, становить:

$$\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{\text{вн}}, \quad (1.2)$$

де \dot{U}_0 – напруга холостого ходу – напруга, що наводиться у вимірювальній котушці при розташуванні ВСП поза отвором, $\dot{U}_{\text{вн}}$ – внесена напруга – частина вихідної напруги, що виникає внаслідок внесення ВСП у отвір. Отже тільки друга складова напруги пов’язана з властивостями ОК.

У вихрострумовому контролі розглядається відносна внесена напруга $\dot{U}_{\text{вн}}^* = \dot{U}_{\text{вн}} / |\dot{U}_0|$. Зручність використання цього параметру полягає в тому, що $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ не залежить від кількості витків котушки та струму збудження. На етапі виконання експериментальних досліджень саме ця складова підлягає вимірюванню; на етапі аналізу задачі ВСК величина $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ може задаватись аналітично чи графічно у вигляді годографів. Годограф – це зображення комплексної функції на комплексній площині за сталих значень певних параметрів функції.

Основне обмеження застосування вихрострумового методу пов’язано з дією т.з. скін-ефекту, або поверхневого ефекту. Він полягає в загасанні електромагнітної хвилі в процесі її заглиблення у електропровідне середовище. Ця властивість середовища кількісно визначається поняттям “глибини проникнення” вихрових струмів z_δ . За значення z_δ прийнято таку відстань від поверхні середовища, на якій щільність вихрових струмів зменшується в “е” разів

$$z_\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}}, \quad (1.3)$$

де f – частота електромагнітної хвилі, μ , γ – відповідно абсолютна магнітна проникність та питома електропровідність середовища. Значення z_δ швидко зменшуються зі збільшенням частоти. Однак мала глибина проникнення не перешкоджає застосуванню вихрострумового методу для контролю металізації з огляду незначних товщин останньої.

Експериментальна частина

4. Налаштування та принцип дії вимірювача товщини металізації «ИТМ-11»

В лабораторній роботі товщина металізації вимірюється за допомогою приладу «ИТМ-11» (измеритель толщины металлизации). Вимірювач «ИТМ-11» призначено для безконтактного вимірювання товщини мідної металізації отворів друкованих плат. Ця операція виконується на етапі налаштування параметрів технологічного процесу виготовлення друкованих плат.

Основні технічні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання товщини металізації – 5 – 50 мкм;
- діаметр отворів – $(1 \pm 0,06)$ мм та $(1,3 \pm 0,05)$ мм;
- товщина плат – $(1 \pm 0,03)$ мм, $(1,5 \pm 0,06)$ мм, $(2 \pm 0,1)$ мм;
- основна похибка вимірювання – до 15 % від верхньої межі вимірювання;
- робоча частота – 100 кГц.

4.1. Конструкція перетворювача

Основою приладу є надмініатюрний лінійний (без феромагнітного осердя) вихрострумний перетворювач, приведений на рис. 1.3. ВСП конструктивно виконаний у вигляді тонкої плівки 1, на яку методом травлення нанесено прямокутні вимірювальну 2 та збуджуючу 3 рамки. Плівка 1 закріплюється на основі 4. Така котушка створює магнітний потік радіального спрямування. Внаслідок цього в стінках металізації збуджуються вихрові струми осьового напрямку.

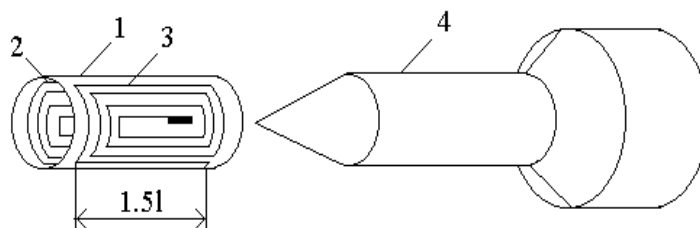


Рис. 1.3. Вихрострумний перетворювач: 1 – вихрострумний перетворювач, 2 – вимірювальна рамка, 3 – збуджуюча рамка, 4 – основа для перетворювача

За рахунок рівномірного розміщення повздовжніх провідників ВСП по його поверхні зменшено похибки вимірювання, що виникають під впливом радіальних переміщень ВСП у отворі плати, оскільки віддалення провідників ВСП від стінки

Годографи $\dot{U}_{\text{вн}}(T), \dot{U}_{\text{вн}}(d)$ подібні до годографів накладних ВСП за відповідної заміни d на зазор h . Розглянемо годографи накладного ВСП, які наведено на рис. 1.4.

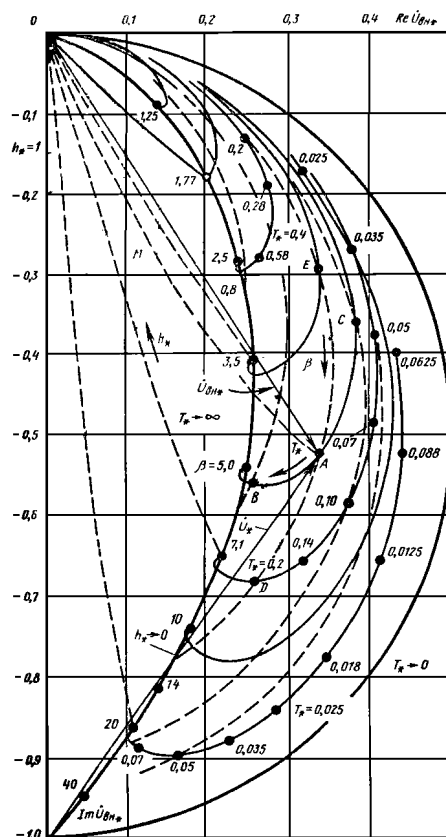


Рис. 1.4. Годографи $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ для контролю параметрів
неферромагнітного листа

Зображені на рисунку криві – це лінії, які описує на комплексній площині кінець вектора $\dot{U}_{\text{вн}}^*(p, \beta)$ при зміні певного параметра p та узагальненого параметра $\beta = D_e \sqrt{\omega \gamma \mu_0}$ (ω – кутова частота, γ – питома електропровідність, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнітна стала, D_e – еквівалентний діаметр вихрових струмів, визначається діаметром ВСП) і незмінних інших параметрах системи. Зовнішня крива у формі напівкола – це годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*(\beta)$ за відносної товщини неферромагнітного

листа $T^* = \frac{T}{D_e} = 0$, а внутрішня крива – годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*(\beta)$ у випадку $T^* \rightarrow \infty$. В обмеженій цими кривими області безперервні лінії – це годографи $\dot{U}_{\text{вн}}^*(T^*)$ за сталих значень β (кожній кривій відповідає певне числове значення β , яке позначено на внутрішньому годографі), а пунктирні криві – $\dot{U}_{\text{вн}}^*(\beta)$ за сталих значень T^* .

Основна перевага годографа полягає в тому, що він дає змогу оцінити вплив того чи іншого фактора на модуль та фазу відносної внесеної напруги. Припустимо, що номінальним значенням параметрів β та T^* відповідає точка А (рис. 1.4). Збільшення T^* за незмінних інших параметрів приводить до переміщення цієї точки по безперервній лінії – лінії $\beta = \text{const}$, в напрямку точки В. Зменшення товщини T^* веде до переміщення в напрямку точки С. Зміна ω та γ приводить до відповідної зміни β , отже і до переміщенню точки А по штриховій: при збільшенні цих параметрів в напрямку точки D, а при зменшенні – в напрямку т. Е.

Наведені на рис. 1.4 криві отримані для ідеалізованого випадку, коли висота розташування ВСП над ОК $h = 0$, отже відносна висота $h^* = \frac{h}{D_e} = 0$. Збільшенні цього зазору веде до пропорційного зменшення внесеної напруг – всі криві «стягуються» в точку початку координат.

4.2. Структурна схема приладу

Структурна схема приладу наведена на рис. 1.5 і складається з Г – генератора, К – компенсатора, ВСП – вихрострумового перетворювача, ПП – попереднього підсилювача, СФ – смугового фільтра, АТ – атенюатора, П – підсилювача зі змінним коефіцієнтом підсилення, АД – амплітудного детектора, А – мікроамперметра. Схема реалізує амплітудний метод виділення корисної інформації. Генератор Г виробляє синусоїдні коливання. Виносний датчик призначений для створення поля збудження і формування напруги $\dot{U}_{\text{вн}}$. Малі розміри ВСП та мала кількість витків котушок ВСП не дають змоги отримати значні напруги \dot{U}_0 та $\dot{U}_{\text{вн}}$ – ці напруги не перевищують значень відповідно 1-2 мВ та 100-500 мкВ. Тому для усунення впливу кабелю у датчику Д крім ВСП розташований попередній підсилювач ПП.

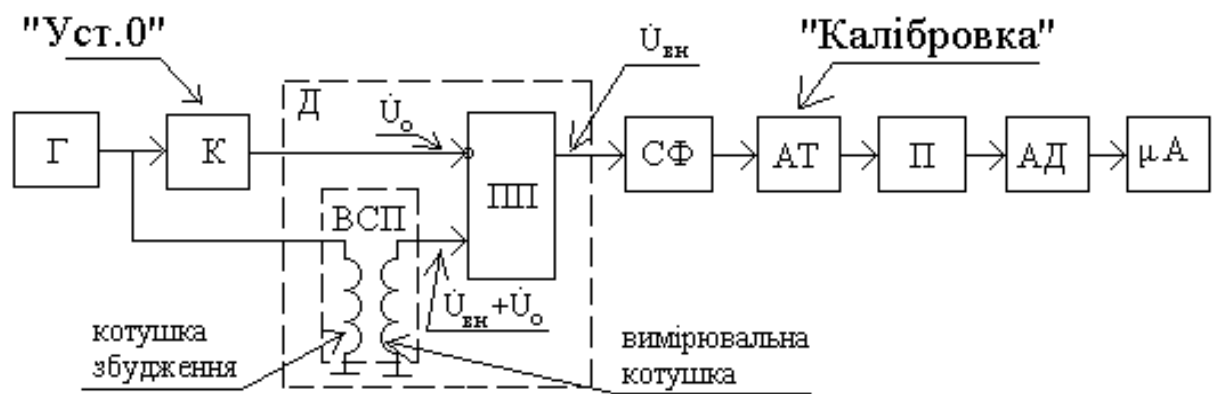


Рис. 1.5. Структурна схема приладу для вимірювання товщини металізації

Неінформативна частина вихідної напруги датчика – напруга холостого ходу \dot{U}_0 , компенсується за допомогою компенсатора К. Компенсатор виробляє напругу, яка дорівнює \dot{U}_0 і віднімається від вихідної напруги ВСП. Ознакою компенсації є нульове положення стрілки мікроамперметра після виведенні датчика з отвору. Фільтр СФ виділяє першу гармоніку сигналу. Коефіцієнт передачі атенюатора АТ змінюється в процесі калібровки приладу після введення датчика у еталонний отвір. Коефіцієнт підсилення П встановлюється залежно від товщини плати.

Вихідна напруга підсилювача пропорційна товщині металізації і вимірюється мікроамперметром, який проградуєвано безпосередньо в одиницях вимірювання товщини – мкм. Прилад має близьку до лінійної характеристику градуювання, що дозволяє виконувати градуювання по 2 точкам: нуля та поблизу верхньої межі вимірювання. Калібрувальний зразок закріплено на кришці приладу. Повну характеристику градуювання було отримано шляхом експериментальних досліджень на фізичних моделях типу "отвір–ВСП", збільшених у 15 разів.

Слід зазначити, що амплітудний спосіб вимірювання товщини має одну суттєву ваду – результати вимірювань залежать від діаметру отвору (тобто від зазору між ВСП і стінкою металізації). Тому у наступних модифікаціях приладу використано фазовий спосіб вимірювання.

4.3. Налаштування та управління приладом

На передній панелі приладу розташовані клавіші:

- "~" – вмикання приладу,
- "0" – включення режиму установлення нуля,
- "К" – включення режиму калібрування,
- "D" – вибір діаметру отворів,

"S" – вибір товщини плати,
та ручки двох потенціометрів під клавішею "0" для встановлення нуля індикатора і потенціометра для калібрування під клавішею "K".

5. Порядок виконання роботи

УВАГА! Будьте обережні в роботі з мініатюрним датчиком! Вводити/виводити датчик в отвір і з отвору треба строго перпендикулярно до поверхні плати без надмірних зусиль і за можливості не торкаючись стінок отвору для запобігання пошкодженню датчика.

1. Підготовка приладу до роботи.

1.1. Увімкніть прилад і прогрійте його упродовж 15 хвилин.

1.2. Встановіть режим "Установка 0" і добийтесь нульового положення стрілки мікроамперметра, обертаючи викруткою по черзі потенціометри установки 0. Ручка потенціометра калібрування повинна знаходитись в крайньому правому положенні.

1.3. Установіть режим "Калібрування". Введіть датчик в отвір еталонного зразка, який знаходиться під захисною кришкою зверху на корпусі приладу. Обертаючи ручку потенціометра установіть показання приладу 40 мкА.

1.4. Виведіть датчик з отвору. В режимі "Установка 0" показання приладу не повинні перевищувати 1 мкА. Якщо ця умова не виконується повторіть п. 1.2.– 1.3.

2. Проведення вимірювань.

Установіть положення кнопок "D" та "S" за вказівкою викладача у відповідності до параметрів досліджуваної плати. Виконайте вимірювання товщини T металізації 10 – 15 отворів за вказівкою викладача. У випадку відхилення товщини плати та діаметру отворів від номінальних значень внесіть поправки в результати вимірювань за формулою

$$T_n = T \cdot \frac{d}{d_n} \cdot \frac{S_n}{S}, \quad (1.4)$$

де d , d_n – дійсне та номінальне значення діаметрів, S , S_n – дійсне та номінальне значення товщини плати.

Занесіть результати вимірювань та розрахунків в таблицю 1.1.

Оцінки математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення результатів вимірювання визначаються за формулами:

$$\hat{m}[T] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad (1.5)$$

$$\hat{\sigma}[T] = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \hat{m}[T])^2}, \quad (1.6)$$

Таблиця 1.1. Результати вимірювань та розрахунків

№	T_i [мкм]	T_{ni} [мкм]	$\Delta T_s = T_s - \hat{m}[T_s]$ [мкм]	$\Delta \Gamma_i^2$ [мкм ²]	Груба помилка (так/ні)
1					
2			
3					
4					
5					
6					
7					
8					

3. Визначить абсолютну похибку вимірювання приладу та оцінку середньоквадратичного відхилення похибки вимірювання (за правилом 3σ).

4. Для вказаного викладачем бракувального рівня $T_{бр}$ визначить вірогідність контролю товщини металізації в припущенні, що похибки вимірювання та товщина металізації, як випадкові величина, розподілені за гауссовим законом розподілу ймовірності.

5. Визначить глибину проникнення вихрових струмів у матеріал стінки металізації та порівняйте цю величину з товщиною металізації.

6. Зробіть висновки.

6. Контрольні запитання

1. В чому полягає фізична сутність вихрострумового способу контролю товщини шару металізації отворів друкованих плат?

2. Дайте порівняльну характеристику відомих способів контролю металізації отворів друкованих плат.

3. Поясніть роботу вимірювача товщини металізації за його структурною схемою.

4. Як оцінити вплив різних факторів на внесену напругу ВСП за годографом?

5. Як впливають параметри об'єкту контролю на вибір робочої частоти у випадку вимірювання їх товщини вихрострумовим методом?

7. Література

1. Середюк, О. Є. Електричний, магнітний та електромагнітний види неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі: навч. посіб. / О. Є. Середюк, О. Б. Барна, О. С. Криницький. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 348 с.
2. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, Ковалев А. В. и др.; под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
3. Герасимов В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Клюев, В.В. Шатерников, В.Е. Шатерников – М.: Энергоиздат, 1983. – 272 с.
4. Потапов А. И. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько – СПб.: Нестор-История, 2014. – Т.1.: Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок. – 2014. – 480 с.
5. Неразрушающий контроль: справочник в 5 кн. / Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – Кн 3: Электромагнитный контроль: Прак. пособие. –1992. – 312 с.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ НЕМАГНІТНИХ ПОКРИТТІВ НА МАГНІТНІЙ ОСНОВІ

Мета роботи: дослідження методів та методик визначення товщини покриття приладами магнітного та електромагнітного неруйнівного контролю, отримання навичок роботи з приладами.

Теоретичні відомості

1. Опис методів вимірювання товщини

У всьому світі створено й експлуатується велика кількість магнітних приладів, призначених для контролю товщини захисних покриттів на виробках з феромагнітних матеріалів. Значну групу таких приладів становлять товщиноміри пондеромоторної дії, робота яких основана на вимірюванні сили відриву або сили притягання постійних магнітів чи електромагнітів до об'єкту контролю (ОК).

На результати вимірювань товщини покриттів значною мірою впливають магнітні параметри матеріалу деталі, на яку нанесене покриття. Тому магнітні товщиноміри калібрують за допомогою робочих зразків, виготовлених з того ж матеріалу, що і контрольовані деталі з покриттям відомої товщини.

Основний недолік приладів цієї групи – складність автоматизації процесу контролю, значний вплив на результати вимірювання шорсткості поверхні виробу.

Прилади магніто-статичного типу не мають цих недоліків. Дія їх основана на визначенні варіації напруженості магнітного поля (за допомогою датчиків Холла, ферозондів, магніторезисторів, та інш.) у ланцюзі електромагніту або постійного магніту за зміни відстані між ним і феромагнітним виробом через наявність немагнітного покриття. Покази магніто-статичних товщиномірів не залежать від електропровідності матеріалу покриття, що дає змогу контролювати захисні неферомагнітні електропровідні покриття на феромагнітній основі.

Для контролю товщини немагнітних покриттів на феромагнітній основі широке поширення отримали індукційні товщиноміри. Дія їх ґрунтується на реєстрації електрорушійної сили (ЕРС) у сигнальній обмотці перетворювача, що виникає внаслідок зміни магнітного опору в ланцюзі «перетворювач – феромагнітний матеріал». Тому для вимірювання використовують єдині шкали для

всього діапазону контрольованих немагнітних покриттів. Для зменшення похибки вимірювання, що становить для таких приладів 5-10%, електромагнітне поле локалізують за допомогою подовженого феромагнітного стержня й кулькового наконечника. Останній дає можливість вимірювати товщину в точці контролю площею 1 мм. Крайовий ефект проявляється на відстані порядку 3–4 мм до краю виробу. Відхилення осі датчика від положення нормалі до контрольованої поверхні в межах 10° не приводить до відчутного збільшення похибки вимірювання.

Широке застосування у вимірюваннях товщини покриттів на електропровідних основах знайшли прилади електромагнітного контролю.

Електромагнітний контроль (метод вихрових струмів) заснований на реєстрації змін електромагнітного поля вихрових струмів, що наводяться збуджуючою обмоткою в електропровідних ОК. В цьому разі реєструється зміна ЕРС у сигнальній обмотці вхідного перетворювача, що виникає за зміни товщини покриття. Інтенсивність і розподіл вихрових струмів в об'єкті залежить від його геометричних, електромагнітних параметрів і від взаємного розташування вимірювального вихрострумівого перетворювача й об'єкта.

В якості перетворювача використовують зазвичай індуктивні котушки (одну або декілька). Синусоїдний або імпульсний струм, що діє в котушках ВСП, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електропровідних об'єктах. Електромагнітне поле вихрових струмів впливає на котушки перетворювача, наводячи в них ЕРС або змінюючи їхній повний опір. Реєструючи напругу на клеммах котушки або її опір, одержують інформацію про властивості об'єкта, товщину захисного діелектричного покриття й про положення перетворювача відносно ОК.

ЕРС (або опір) перетворювача залежить від багатьох параметрів ОК, що визначає перевагу й труднощі реалізації методів вихрових струмів (МВС). З одного боку, МВС дає змогу здійснити багатопараметровий контроль; з іншого боку, потрібні спеціальні прийоми для відокремлення інформації про певні параметри ОК. У випадку контролю одного з параметрів вплив інших на сигнал перетворювача стає зайвим і цей вплив необхідно заглушити. Інша особливість електромагнітного контролю полягає в тому, що його можна проводити без механічного контакту перетворювача і об'єкта. Тому цей метод використовують для контролю за високих швидкостей руху ОК відносно ВСП. На інформаційні сигнали ВСП практично не впливають вологість, тиск і забруднення газового середовища, радіоактивні випромінювання, забруднення поверхні ОК непровідними речовинами.

МВС дає змогу успішно вирішувати завдання контролю геометричних розмірів виробів. Цим методом вимірюють діаметр дроту, прутків і труб; товщину металевих листів і стінок труб при однобічному доступі до об'єкту; товщину електропровідних (наприклад, гальванічних) і діелектричних (наприклад, лакофарбових) покриттів на електропровідних основах; товщини шарів багатошарових структур, що містять електропровідні шари. Допускається зміна вимірюваних товщин в межах від одиниць мікрометрів до 2–3 десятків міліметрів. Для більшості приладів похибка результату вимірювання становить 5-10%. Мінімальна площа зони контролю може бути доведена до 1 мм², що дає можливість вимірювати товщину покриття на малих деталях складної конфігурації. МВС дає змогу контролювати зазори й вібрації деталей.

Структурна схема приладу для електромагнітного контролю визначається його призначенням і способом виділення інформації про контрольовані параметри об'єкта. Сигнали перетворювача (напруга або повний опір) мають комплексний характер. Це дає змогу реалізувати на одній робочій частоті двопараметровий контроль, якщо вплив двох параметрів об'єкта на параметри сигналу можна відокремити. В якості носія інформації може бути використана амплітуда напруги перетворювача чи його фаза, або проекція вектора напруги на вибраний напрямок на комплексній площині, або одна зі складових (дійсна або уявна) комплексної напруги чи їхня комбінація.

Експериментальна частина I

2.1. Експериментальна установка

До складу експериментальної установки входить магнітний товщиномір МТ-40НЦ, вихрострумний прилад для вимірювання товщини неелектропровідних покриттів ВТ-10НЦ, зразки діелектричних плівок різної відомої товщини, що використовують як фізичні моделі покриття, феромагнітні та слабомагнітні деталі, що імітують основу ОК.

Прилади МТ-40НЦ і ВТ-10НЦ призначені для контролю товщини покриттів, відповідно, на феромагнітній та слабомагнітній електропровідній основі. У першому приладі реалізований магнітний метод, а в другому – метод вихрових струмів.

Структурна схема магнітного товщиноміру МТ-40НЦ наведена на рис. 2.1.

Перетворювач приладу складається із двох індуктивно зв'язаних між собою котушок, що мають загальне осердя, виконане з феромагнітного матеріалу.

Перетворювач забезпечує перетворення неелектричної величини (товщини немагнітного покриття) в електричну напругу, амплітуда якої відповідає певному значенню товщини покриття. Первинна обмотка перетворювача складається з однієї котушки, живиться від генератора напруги прямокутної форми із частотою 200 Гц. Вторинна обмотка має дві котушки, включені диференціально. Таке включення забезпечує мінімальне значення початкового розбалансу перетворювача за достатнього віддалення його від феромагнітної основи й збільшує чутливість перетворювача у випадку наближення до нього. Феромагнітне осердя локалізує магнітний потік перетворювача.

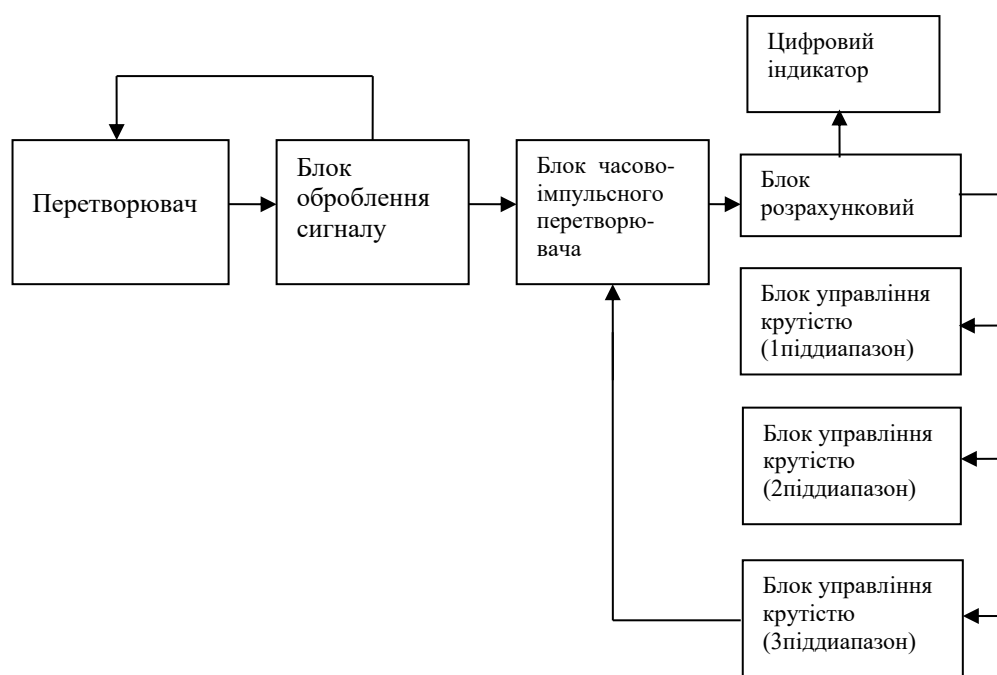


Рис. 2.1. Структурна схема магнітного товщиноміру МТ-40НЦ

Блок оброблювання сигналу включає генератор напруги прямокутної форми та власне канал опрацювання сигналу, що має підсилювач низької частоти, фазочутливий випрямляч, транзисторний ключ і два підсилювачі постійного струму.

Генератор формує прямокутні коливання, що пройшли процедуру підсилення потужності. Служить генератор для живлення первинного перетворювача й для формування опорної напруги, що подається в канал оброблення сигналу.

Повний діапазон контрольованих приладом МТ-40НЦ товщин становить від 0 до 2000 мкм і розділений на піддіапазони з такими межами:

- 1 піддіапазон – від 0 до 20 мкм;
- 2 піддіапазон – від 20 до 200 мкм;
- 3 піддіапазон – від 200 до 2000 мкм.

Можливе також ручне підстроювання початкового й кінцевого значень піддіапазону вимірювання на контрольних зразках або мірах товщини. Основна похибка приладу, що допускається за нормальних умов застосування, виражена в мікронах.

Структурна схема магнітного товщиноміра ВТ-10НЦ наведена на рис. 2.2.

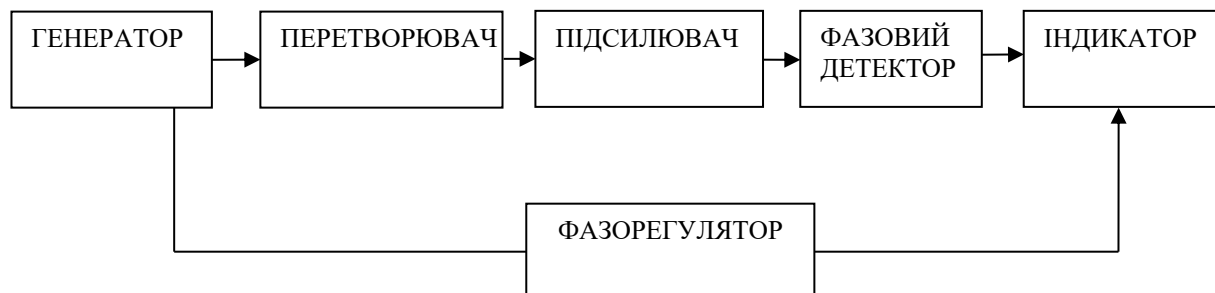


Рис. 2.2. Структурна схема вихрострумовевого товщиноміра ВТ-10НЦ

Принцип дії перетворювача оснований на збудженні в металі вихрових струмів і наступній реєстрації електромагнітних полів цих струмів за допомогою сигнальних обмоток перетворювача.

Діапазон контрольованих приладом ВТ-10НЦ товщин – від 0 до 1000 мкм, і розбитий на піддіапазони з межами вимірювання:

1 піддіапазон – від 0 до 200 мкм;

2 піддіапазон – від 100 до 1000 мкм.

2.2. Методика й порядок виконання роботи

Після ознайомлення із призначенням приладів, що використовуються, і перевірки наявності заземлення корпусів приладів, з дозволу керівника заняття студенти вмикають прилади в мережу живлення й прогрівують їх протягом 15 хвилин.

Вказані керівником заняття плівки почергово встановлюють на магнітну основу і вимірюються приладом МТ-40НЦ. Встановлений на приладі піддіапазон узгоджується з товщиною плівки, попередньо виміряної за допомогою мікрометра.

Калібрування приладу. Спочатку перетворювач встановлюють на основу без покриття. У випадку роботи на I піддіапазоні, обертаючи ручку "Уст. 0", намагаються встановити число 0 на індикаторі приладу. Якщо при цьому загорається лампочка "--", то необхідно повернути ручку "Уст. 0" за годинниковою стрілкою так, щоб лампочка згасла, а на індикаторі встановилось значення – 0. У випадку роботи на другому й третьому піддіапазоні, обертаючи ручку "Уст. 0", встановлюють початкове значення піддіапазона (20 або 200 мкм). Потім

установлюють перетворювач на основу з плівкою, що відповідає кінцевому значенню піддіапазону приладу (20, 200 й 2000 мкм). Поверхня основи повинна мати шорсткість не гірше 1,25. Обертаючи ручку "Чувст." встановлюють на цифровому індикаторі значення, що відповідає товщині встановленої міри.

Встановлення границь піддіапазонів за методикою, викладеною вище, повторюють 2-3 рази до повної відповідності показань приладу товщинам встановлених плівок. Після виконання вищевказаних операцій роблять вимірювання товщини всіх плівок з відповідного піддіапазону.

У випадку контролю товщини покриттів, вказаних керівником занять, на слабомагнітній основі за допомогою приладу ВТ-10НЦ перемикачем піддіапазонів встановлюють піддіапазон, що відповідає товщині покриттів, які підлягають вимірюванню. Кнопку «Баланс» фіксують у вихідному положенні. Встановлюють перетворювач на основу із шорсткістю поверхні не нижче 1,25. Обертаючи ручку "Уст 0" встановлюють нульове показання індикатора. Далі перетворювач встановлюють на основу з плівкою, товщина якої відповідає кінцю робочої шкали приладу (1200 або 2000 мкм). Обертаючи ручку "Чувст." встановлюють відповідне показання цифрового індикатора. Після проведення вищевказаних операцій виконують вимірювання товщини плівок.

У випадку переходу на інший піддіапазон вимірювань, а також при зміні матеріалу основи, виконують повторне налаштування (калібрування) приладу за вищевикладеною методикою.

2.3. Завдання

1. Підготуйте прилад МТ-40НЦ до роботи.
2. Проконтролюйте цим приладом товщину плівок, вказаних керівником занять, почергово встановлюючи їх на феромагнітну основу. Дані занесіть до таблиці 2.1.
3. Виміряйте товщину плівок мікрометром і занесіть отримані результати до таблиці 2.1. Ці дані використовуйте як дійсну товщину плівок.
4. Виконайте оцінювання похибки вимірювання.
5. Зробіть висновки по роботі.

Таблиця 2.1. Результати вимірювань та розрахунків

№	Виміряна товщина $d_{вим}$, [мкм]	Дійсна товщина $d_{реал}$, [мкм]	Різниця Δ , [мкм]	δ , % $\delta = \frac{\Delta}{d_{реал}} \cdot 100\%$
1				
2				
3				
...				

Експериментальна частина II

3.1. Опис товщиноміра покриттів ТП-44М

Прилад призначений для вимірювання товщини діелектричних і електропровідних неферомагнітних покриттів на феромагнітних основах з використанням індукційних перетворювачів Ф2.

Діапазон вимірюваних товщин покриттів для перетворювача Ф2 складає 0 ... 5000 мкм. Межа допустимого значення основної похибки вимірювального приладу не більше $0,03 T + 0,002$ мм, де T – виміряне значення товщини. Дискретність виміру для датчика – 0,001 мм (в діапазоні до 0,999 мм); 0,01 мм (в діапазоні від 1,00 мм).

Принцип дії приладу базується на індукційному магнітному методі вимірювання. Конструкція приладу включає електронний блок, до якого приєднується за допомогою кабелю датчик. Кнопки управління знаходяться на передній панелі приладу, де також розташований графічний індикатор з підсвічуванням. У нижній частині корпусу приладу під кришкою знаходиться відсік, в який встановлюються елементи живлення.

3.2. Порядок роботи з приладом ТП-44М

1. Включити прилад натисканням клавіші " ВКЛ / ВИКЛ". Під час включення датчик повинен знаходитися на відстані не менше 100 мм від металевих предметів до тих пір, поки не згасне символ "стрілка вгору" в лівій частині індикатора. Після включення прилад перейде у режим вимірювання (основний) . Вид екрану представлений на рис. 2.3.

Якщо напруга живлення виявиться нижче робочої, на індикаторі буде показано "БАТРЕЯ розряджена". У цьому випадку необхідно вимкнути прилад, провести заміну елементів живлення, після чого включити прилад.



Рис. 2.3. Екран приладу ТП-44М

2. У нижній частині індикатора відображається тип датчика.
3. Проведення вимірювання товщини покриттів перетворювачем Ф2:
 - встановити перетворювач на ОК перпендикулярно до поверхні і притиснути його, не допускаючи похитування, далі пролунає одиночний звуковий сигнал, а на індикаторі відобразиться результат виміру (рис. 2.4);



Рис. 2.4. Відображення результату вимірювання на екрані приладу ТП-44М

- підняти перетворювач у повітря. У лівій частині індикатора з'явиться значок "стрілка вгору". Під час її відображення не можна проводити наступне вимірювання. Потім стрілка зникне і пролунає подвійний короткий звуковий сигнал, що повідомляє про можливість проведення наступного вимірювання. Якщо результат вимірювань, що відображається на індикаторі буде придатний для коригування, то на місці значка "стрілка вгору" з'явиться значок "два трикутника".

4. Установка нуля (дана процедура проводиться тільки у вимірювальному режимі):
 - встановити перетворювач контактною площадкою на непокритий метал і провести вимірювання;
 - клавішами "Стрілка вгору" і "Стрілка вниз" встановити курсор на напис "НУЛЬ" і натиснути клавішу "Введення". Для того щоб показання приладу при контролі покриттів на деталях відповідали реальним, необхідно провести його коригування (п. 5) на підготовленому зразку контрольованої деталі або конструкції без покриття, аналогічному або близькому за геометричними і електрофізичними властивостями та механічною обробкою контрольованій деталі або конструкції. При установці нуля серія буде перервана, лічильник вимірювань фіксує значення $N=0$ у правому верхньому куті.

Примітка: операцію установки нуля бажано проводити в разі змін умов

експлуатації (значної зміни температури навколишнього середовища) або зміні електропровідності матеріалу основи.

5. Коригування показань:

Якщо після установки нуля виміряне значення товщини покриття відрізняється від відомої товщини на величину, що переважає похибку приладу , необхідно провести коригування показань. Для цього клавішами "Стрілка вгору" і "Стрілка вниз" підвести курсор до значка "два трикутника" в лівій частині екрану і натиснути клавішу "Введення". На індикаторі будуть відображатися скореговані значення товщини (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Відображення скорегованих значень товщини

Клавішами "Стрілка вгору" і "Стрілка вниз" встановити відоме значення товщини і натиснути клавішу "Введення", прилад перейде у режим вимірювання.

6. Проведення вимірювань і установка нуля з усередненням:

Усереднення виконується автоматично під час проведення будь-яких вимірювань. Поряд з поточними результатами вимірювання, що з'являтимуться в центрі екрану, в правому верхньому куті індикатора відображається кількість вимірювань " N =" і середнє значення " x =". Щоб перервати серію вимірювань необхідно виконати операцію "СБРОС " – для цього клавішами "Стрілка вгору" і "Стрілка вниз" в основному режимі встановити курсор на напис "СБРОС " у лівому верхньому кутку екрану і натиснути клавішу "Введення". При цьому серія буде перервана , лічильник вимірювань зафіксує значення $N=0$, а усереднений результат вимірювань буде відображатися в центрі екрана.

7. При вимірюванні товщини покриттів на шорстких основах може знадобитися установка нуля з усередненням. Для установки нуля з усередненням, слід провести серію вимірювань на металі без покриття в різних точках на поверхні об'єкта і виконати "СБРОС", потім клавішами "Стрілка вгору" і "Стрілка вниз " встановити курсор на написі "НУЛЬ " і натиснути "Введення".

3.3. Завдання

1. Підготуйте прилад ТП-44М до роботи.
2. Проконтролюйте товщину плівок, вказаних керівником занять, встановлюючи їх по чергово на феромагнітну основу. Дані занесіть до табл. 2.2.
3. Виміряйте товщину плівок мікрометром та занесіть дані до табл. 2.2.
4. Виконайте оцінку похибки вимірювання.
5. Зробіть висновки по роботі.

Таблиця 2.2. Результати вимірювань та розрахунків

№	Виміряна товщина $d_{вим}$, [мкм]	Дійсна товщина $d_{реал}$, [мкм]	Різниця Δ , [мкм]	δ , % $\delta = \frac{\Delta}{d_{реал}} \cdot 100\%$
1				
2				
...				

4. Навчально-дослідницька робота студентів

За вказівкою викладача виконайте перевірку товщиномірів. Методики перевірки викладені в технічних описах товщиномірів. Дослідіть вплив на показання товщиномірів:

- матеріалів основи і їхньої товщини;
- чистоти обробки поверхні основи;
- кривизни контрольованої поверхні;
- крайового ефекту;
- орієнтації перетворювача відносно поверхні об'єкта.

5. Контрольні запитання

1. В чому полягає фізична сутність магнітної товщинометрії?
2. Дайте стислу характеристику відомих способів магнітної товщинометрії.
3. В чому полягає фізична сутність вихрострумової товщинометрії?
4. Які чинники впливають на похибку вимірювання товщини покриття магнітним методом?
5. З якою метою проводять калібрування магнітних товщиномірів?
6. Поясніть роботу магнітного товщиноміра МТ-40НЦ використовуючи для цього його структурну схему.

6. Література

1. Куц Ю.В. Магнітний неруйнівний контроль. Навчальний посібник. / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко, В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко – Київ: НТУУ "КПІ". – 2012. – 139 с.
2. Середюк, О. Є. Електричний, магнітний та електромагнітний види неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі: навч. посіб. / О. Є. Середюк, О. Б. Барна, О. С. Криницький. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 348 с.
3. Товщиномір магнітний МТ-40НЦ. Технічний опис (видається лаборантом)
4. Прилад для вимірювання товщини неелектропровідних покриттів ВТ-10НЦ. Технічний опис. (видається лаборантом)
5. Потапов А. И. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько – СПб.: Нестор-История, 2014. – Т.1.: Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок. – 2014. – 480 с.
6. Моделі та міри у вимірюваннях [Електронний ресурс] : монографія / В. П. Бабак, В. С. Єременко, Ю. В. Куц, М. В. Мислович, Л. М. Щербак ; за ред. В. П. Бабака ; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,05 Мбайт). – Київ : Наукова думка, 2019. – 197 с

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗОВНІШНІХ ПРОХІДНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета роботи: ознайомлення з обладнанням, методикою розрахунку та експериментального визначення залежності внесеного комплексного опору прохідного зовнішнього параметричного вихрострумowego перетворювача (ВСП) від параметрів об'єктів контролю. Набуття навичок виявлення та визначення характеру дефекту та вміння виконувати порівняльний аналіз результатів, отриманих розрахунковим і експериментальним способами.

Теоретичні відомості

1. Матеріали та обладнання

Об'єктами контролю (ОК) є зразки циліндричної форми довжиною $l = 80$ мм та діаметрами від 34 до 35 мм з інтервалами 0,1 мм. Матеріал зразків ОК – бронза (питома електропровідність $\gamma = 2,75 \cdot 10^7$ См/м), дюралюміній ($\gamma = 4,87 \cdot 10^7$ См/м), за вказівкою викладача.

Портативний RLC вимірювач E7-22.

Параметричний ВСП з довжиною обмотки $l=70,5$ мм та числом витків $W_1=995$.

2. Фізична сутність контролю

Вихрострумові методи неруйнівного контролю часто реалізують за допомогою параметричних (однокотушкові) ВСП за їх збудження змінним електричним струмом, найчастіше синусоїдної форми. Їх комплексний опір змінюється у випадку зміни вихрових струмів, що наводяться цією котушкою в електропровідному ОК.

Зовнішній прохідний параметричний ВСП, що використовується в роботі, має одну котушку, комплексний опір якої залежить від електромеханічних характеристик і параметрів ОК та конструктивних особливостей системи ВСП – ОК. У випадку введення ОК у ВСП, за умови електропровідного і немагнітного матеріалу ОК, активна складова комплексного опору збільшується на величину внесеного активного опору, а індуктивна складова зменшується на величину

внесеної індуктивної складової. Отже про властивості ОК та зміну його положення відносно ВСП можна дізнатись з інформації про зміну комплексного опору ВСП.

Явища, що виникають в параметричному ВСП, аналогічні явищам в індуктивно пов'язаних контурах. Під час вихрострумовео контролю замість вторинної котушки в змінне електромагнітне поле ВСП вноситься ОК. В останньому наводяться вихрові струми. Метод ґрунтується на визначенні зворотної дії на ВСП вихрових струмів, які створюють своє власне змінне електромагнітне поле. В цьому випадку матеріал ОК зручно представити моделлю у вигляді вторинної електричної обмотки повітряного трансформатора, що навантажена на певний умовний опір. В цьому випадку вплив ОК на ВСП тотожний впливу на ВСП вторинної електричної котушки, яка замкнена на певне навантаження.

Якщо знехтувати розподіленими між витками котушки ємностями, еквівалентну схему ВСП в режимі контролю можна представити рис. 3.1. Схема складається з первинної збуджуючої котушки з активним опором R_1 та індуктивністю L_1 , і вторинної котушки (електричної моделі ОК) з активним опором R_2 та індуктивністю L_2 .

На основі другого закону Кірхгофа для першого і другого контурів схеми маємо такі рівняння:

$$(R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 - j\omega M\dot{I}_2 = \dot{U}, \quad (3.1)$$

$$-j\omega M\dot{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_2 = 0, \quad (3.2)$$

де ω – кругова частота робочого струму ВСП.

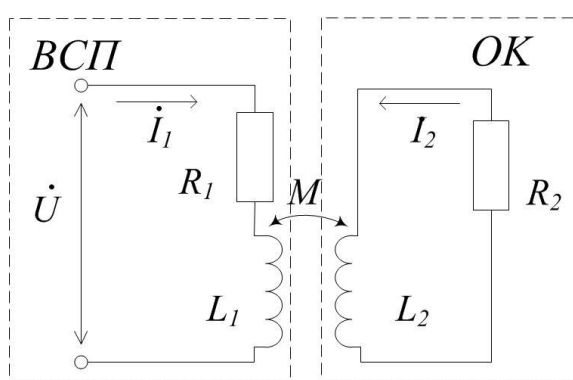


Рис. 3.1 Еквівалентна схема системи параметричний ВСП – ОК

Тоді струм котушки збудження можна представити як:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2 + j\omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} L_2 \right)}. \quad (3.3)$$

Експериментальна частина

3. Порядок виконання роботи

3.1. Розрахункова частина роботи

3.1.1. Для кожного ОК, що задані викладачем, вирахувати узагальнений параметр:

$$\beta_0 = R\sqrt{\omega\mu_0\gamma}, \quad (3.4)$$

на частоті $f = 1$ кГц (значення питомої електропровідності γ дані в п.1, R – радіус циліндричного зразка). Дані занести до таблиці 3.1.

3.1.2. Використати дані таблиці значень ефективної магнітної проникності (Додаток 3.1) та визначити для кожного зі значень узагальненого параметра складові ефективної магнітної проникності $\text{Re } \dot{\mu}_e$ та $\text{Im } \dot{\mu}_e$. Дані занести до таблиці 3.1.

Якщо розраховані і табличні значення не збігаються необхідно застосувати лінійну інтерполяцію даних за формулою:

$$\alpha = \alpha_{\min} + \frac{\Delta\beta_0 (\Delta\alpha)_{\max}}{(\Delta\beta_0)_{\max}}, \quad (3.5)$$

де α – значення складової ефективної магнітної проникності $\text{Re } \dot{\mu}_e$ або $\text{Im } \dot{\mu}_e$, α_{\min} – нижня межа інтервалу з таблиці, який містить розраховане значення β_0 , $(\Delta\alpha)_{\max} = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ – різниця між верхньою і нижньою межею табличного інтервалу, який містить $\dot{\mu}_e$, $\Delta\beta_0 = \beta_0 - \beta_{0_{\max}}$ – різниця між розрахованим значенням узагальненого параметра і нижньою межею табличного інтервалу, $(\Delta\beta_0)_{\max}$ – різниця між верхньою і нижньою межами табличного інтервалу.

3.1.3. Визначити розрахункові значення – внесені активний опір та індуктивність, отримані за формулами:

$$R_{\text{вн.р.}} = -\frac{\pi^2}{2} f W^2 \mu_0 \frac{D^2}{l} \text{Im } \dot{\mu}_{\text{еф}} \text{ [Ом]}, \quad (3.6)$$

$$L_{\text{вн.р.}} = \frac{\pi}{4} W^2 \mu_0 \frac{D^2}{l} (\text{Re } \dot{\mu}_{\text{еф}} - 1) \text{ [Гн]}. \quad (3.7)$$

В цих формулах значення магнітної проникності взяти рівним $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, значення геометричних параметрів D і L необхідно підставляти в метрах, f – у герцах.

Розраховані значення внесених активного опору та індуктивності занести до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Розраховані значення внесених активного опору та індуктивності

$D, \text{ мм}$	β_0	$\text{Re } \dot{\mu}_{\text{еф}}$	$\text{Im } \dot{\mu}_{\text{еф}}$	$R_{\text{вн.р.}}, \text{ Ом}$	$L_{\text{вн.р.}}, \text{ мГн}$
34,0					
..					

3.1.4. Для заданих ОК розрахувати теоретичні значення чутливості ВСП до зміни діаметра ОК та питомої електропровідності його матеріалу:

$$S_{R_{\text{вн}}}^D = \frac{\pi \omega^2 W^2 \gamma \mu_0^2 R^3}{l} \left[(\text{Re } \dot{\mu}_{\text{еф}})^2 - (\text{Im } \dot{\mu}_{\text{еф}})^2 \right] \cdot 10^{-3} [\text{Ом/мм}], \quad (3.8)$$

$$S_{L_{\text{вн}}}^D = -\frac{\pi \omega \mu_0^2 W^2 \gamma R^3}{l} \text{Re } \dot{\mu}_{\text{еф}} \cdot \text{Im } \dot{\mu}_{\text{еф}} \cdot 10^{-3}, [\text{Гн/мм}]. \quad (3.9)$$

Дані занести до Таблиці 3.3.

3.2. Дослідницька частина

3.2.1. Ввімкнути прилад і досліджуваний параметричний ВСП, для цього:

- підключити RLC-вимірювач до параметричного ВСП;
- встановити робочу частоту 1 кГц;
- встановити в режим вимірювання «L» для вимірювання індуктивності обмотки ВСП на холостому ході:

$$L_0 = \quad (\text{Гн});$$

- встановити в режим вимірювання «R» для вимірювання активного опору ВСП на холостому ході:

$$R_0 = \quad (\text{Ом}).$$

3.2.2. Установлюючи почергово ОК, надані викладачем, у ВСП, виконати вимірювання активних опорів $R_{\text{вн.е}}$ і індуктивностей $L_{\text{вн.е}}$ в режимі контролю параметрів ОК. Дані занести до таблиці 3.2.

3.2.3. Вирахувати нормовані значення внесених складових $R_{\text{вн.е}}^*$ та $L_{\text{вн.е}}^*$ за результатами експерименту та $R_{\text{вн.р}}^*$ та $L_{\text{вн.р}}^*$ за результатами розрахунку.

$$R_{\text{вн.е}}^* = \frac{R_{\text{вн.е}}}{\omega L_0}, \quad L_{\text{вн.е}}^* = \frac{L_{\text{вн.е}}}{L_0}; \quad (3.10, 3.11)$$

$$R_{\text{вн.п}}^* = \frac{R_{\text{вн.п}}}{\omega L_0}, \quad L_{\text{вн.п}}^* = \frac{L_{\text{вн.п}}}{L_0}. \quad (3.12, 3.13)$$

Отримані результати занести в Таблицю 3.2.

Таблиця 3.2. Розраховані нормовані значення опору та індуктивності

$D, \text{мм}$	$R_{\text{вн.е}}$ Ом	$R_{\text{вн.е}}^*$	$L_{\text{вн.е}}$ мГн	$L_{\text{вн.е}}^*$	$R_{\text{вн.п}},$ Ом	$R_{\text{вн.п}}^*$	$L_{\text{вн.п}}$ мГн	$L_{\text{вн.п}}^*$
34,0								

3.2.4. За результатами експерименту визначити чутливість ВСП до зміни діаметра ОК (на інтервалі 0.1 мм) використовуючи формули (за умови $D_2 > D_1$, мм):

$$S_{R_{\text{вн}}}^D = \frac{R_{\text{вн}}(D_2) - R_{\text{вн}}(D_1)}{D_2 - D_1} [\text{Ом/мм}], \quad (3.14)$$

$$S_{L_{\text{вн}}}^D = -\frac{L_{\text{вн}}(D_2) - L_{\text{вн}}(D_1)}{D_2 - D_1} [\text{мГн/мм}]. \quad (3.15)$$

Дані занести до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Результати розрахунку чутливостей ВСП до зміни діаметру

$D, \text{мм}$	$S_{R_{\text{вн.п}}}^D, \text{Ом/мм}$	$S_{L_{\text{вн.п}}}^D, \text{Ом/мм}$	$S_{R_{\text{вн.е}}}^D, \text{Ом/мм}$	$S_{L_{\text{вн.е}}}^D, \text{Ом/мм}$
...				

3.2.5. Прийняти розраховані значення внесених активних опорів та індуктивностей за дійсні значення та визначити абсолютні похибки вимірювання цих параметрів за формулами:

$$\Delta R_{\text{вн}} = R_{\text{вн.е}} - R_{\text{вн.п}}, \quad (3.16)$$

$$\Delta L_{\text{вн}} = L_{\text{вн.е}} - L_{\text{вн.п}}. \quad (3.17)$$

Отримані результати занести в таблицю 3.4:

Таблиця 3.4. Розрахунок абсолютних похибок

D , мм	$\Delta R_{\text{ВН}}$, Ом	$\Delta L_{\text{ВН}}$, мГн
34,0		

3.2.6. Побудувати годографи нормованих значень внесених опорів та індуктивностей, отриманих експериментальним і розрахунковим шляхами.

4. Зміст звіту

1. Опис конструкції та принципу роботи зовнішнього прохідного параметричного ВСП.
2. Методика проведення експерименту.
3. Методика визначення узагальненого параметру, складових ефективної магнітної проникності і нормованих значень внесених опорів та індуктивностей.
4. Таблиці з даними розрахунків та експерименту.
5. Результати розрахункового та експериментального значень чутливості ВСП.
6. Графіки функціональних залежностей.
7. Годографи нормованих значень внесених сигналів, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхами.
8. Аналіз результатів та висновки по роботі.

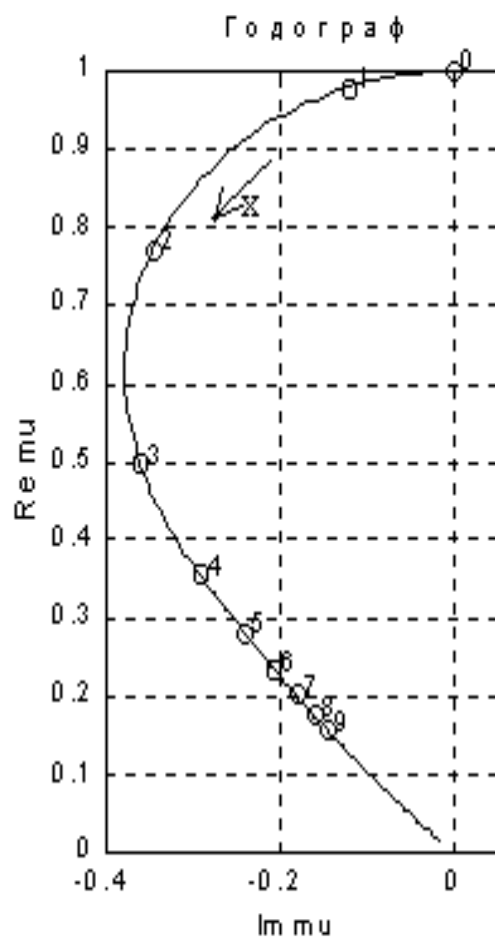
5. Контрольні запитання

1. В чому полягає фізична сутність вихрострумового методу контролю електромагнітних і геометричних параметрів ОК циліндричної форми?
2. Поясніть дію складових системи: «об'єкт контролю – прохідний трансформаторний ВСП».
3. Дайте пояснення сутності поняття «ефективна магнітна проникність».
4. Побудуйте та дайте пояснення годографу ефективної магнітної проникності.
5. Як змінюються відносні внесені опір і індуктивність прохідного ВСП за зменшення (збільшення) радіуса прутка чи електропровідності матеріалу?
6. Які чинники впливають на чутливість прохідних ВСП до зміни радіуса прутка та його електропровідності?

6. Література

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, Ковалев А. В. и др.; под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. Середюк, О. Є. Електричний, магнітний та електромагнітний види неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі: навч. посіб. / О. Є. Середюк, О. Б. Барна, О. С. Криницький. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 348 с.
3. Потапов А. И. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько – СПб.: Нестор-История, 2014. – Т.1.: Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок. – 2014. – 480 с.
4. Неразрушающий контроль: справочник в 5 кн. / Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – Кн 3: Электромагнитный контроль: Прак. пособие. –1992. – 312 с.
5. Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 5, Electromagnetic Testing / Satish S Udpa (technical editor), Patrick O'Moore (editor). – ASNT, 2004. – 536 p.
6. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник. Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т. Назарчука. – Львів: Фізико-механічний ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2001. –1134 с.

Годограф та таблиця значень ефективної магнітної проникності



Таблиця 1

l, x	$Re\ \mu$	$Im\ \mu$
p.1	0.999998	-0.00125
p.2	0.999967	-0.00499977
p.3	0.999831	-0.0112474
p.4	0.999467	-0.0199853
p.5	0.9987	-0.0311942
p.6	0.99731	-0.0448336
p.7	0.995033	-0.0608317
p.8	0.991569	-0.0790727
p.9	0.986592	-0.0993836
1	0.979767	-0.121523
1.1	0.970768	-0.145172
1.2	0.959304	-0.169931
1.3	0.945146	-0.195325
1.4	0.928154	-0.220813
1.5	0.908299	-0.245819
1.6	0.885679	-0.269756
1.7	0.860523	-0.292069
1.8	0.833179	-0.312269
1.9	0.804093	-0.329967
2	0.773777	-0.344896
2.1	0.742769	-0.35692
2.2	0.711598	-0.366035
2.3	0.680751	-0.372347
2.4	0.650648	-0.376057
2.5	0.621629	-0.377429
2.6	0.593948	-0.376766
2.7	0.567778	-0.374385

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ МАГНІТНОЇ ПРОНИКЛИВОСТІ

Мета роботи: вивчення методів визначення та обчислення складових ефективної магнітної проникності та застосування її для знаходження вихідної напруги вихрострумowego перетворювача в режимі контролю.

Теоретичні відомості

1. Основи аналізу роботи вихрострумowych перетворювачів

Аналіз роботи прохідних ВСП та розрахунок вихідних сигналів таких перетворювачів базується на визначенні числових значень комплексно-значного коефіцієнту – ефективної магнітної проникності μ_{ef} [1]:

$$\mu_{ef}(x) = \frac{2J_1(x\sqrt{-i})}{x\sqrt{-i}J_0(x\sqrt{-i})}. \quad (4.1)$$

де $J_m(x\sqrt{-i})$ – функції Бесселя першого роду m -того порядку, x – узагальнений параметр (дійсне число, інколи позначається як β), $i = \sqrt{-1}$. В інженерних розрахунках вдаються до графічного чи табличного способу визначення μ_{ef} [1,2]. Однак ці способи не забезпечують необхідну точність розрахунків, що пов'язано з певним фіксованим кроком зміни параметру x в таблиці.

Система MatLAB [3, 4] має у своєму складі широкий набір команд, операторів та функцій, включаючи функції Бесселя від комплексного аргументу, що робить її зручним інструментом наукових та інженерних розрахунків, аналізу даних та візуалізації інформації у вихрострумовому неруйнівному контролі. Машинна точність розрахунків – $2,2204 \cdot 10^{-16}$, набагато перевищує сучасні потреби обчислень у неруйнівному контролі.

Крім універсальності, високої точності та швидкодії система MatLAB має ще одну унікальну рису – вона є відкритою і може адаптуватись до виконання певних класів задач за рахунок включення додаткових функцій користувача. Ці функції створюються засобами мови MatLAB, яка подібна до широко відомої мови C.

Виконати обчислення $\dot{\mu}_{ef}$ можна, наприклад, за допомогою створення нової процедури (М-файлу) під назвою *teffl.m* з наступним текстом:

```
function ti = teffl(x)
% Програма обчислення ефективної магнітної проникності
% x -узагальнений параметр
% ti-значення ефективної магнітної проникності
ti=2.*besselj(1,x.*sqrt(-j))./(x.*sqrt(-j). *besselj(0,x.*sqrt(-j)))
% крапка перед знаком множення – поелементне множення
% уявна одиниця в MatLAB передається літерами i чи j.
```

Примітка: знак "%" позначає коментарі в процедурі, тобто все, що йде після нього може бути допоміжним довільним текстом в MatLab. Такі рядки використовуються для пояснень, їх можна не писати при виконанні лабораторної роботи на ПК. Файл бажано зберегти в папці "Matlab/Work/".

Після введення в систему цієї функції, достатньо простого звертання *teffl(x)* для отримання відповідного значення $\dot{\mu}_{ef}$ аргументу x . Для створення таблиці значень дійсних та уявних частин $\dot{\mu}_{ef}(x)$ [1,2] достатньо створити новий М-файл (до прикладу, з ім'ям *LabR4.m*) або ввести у вікно Command Window наступні рядки програми:

```
x=1:1:2.7;
% встановлення значень узагальненого параметру (від 0.1 з кроком 0.1
% до 2.7). Межі узагальненого параметру та крок можна змінювати.
Re=real(teffl(x));
% визначення дійсної частини величини ефективної магнітної
% проникності  $\dot{\mu}_{ef}$  через звертання до функції teffl(x), що знаходиться
% в teffl.m
Im=imag(teffl(x));
% визначення уявної частини ефективної магнітної проникності  $\dot{\mu}_{ef}$ 
plot (Im, Re); xlabel('Im teff'); ylabel('Re teff'); grid on;
% побудова годографу  $\dot{\mu}_{ef}$  - по осі абсцис відкладають уявну частину,
% по осі ординат – дійсну; підписання осей передбачено командами
% xlabel, ylabel; виведення сітки на графік – grid.
A=[x' Re' Im'];
```

% створення матриці A , в стовпцях якої будуть – узагальнений

% параметр x , дійсна та уявна частини $\dot{\mu}_{ef}(x)$ (на зразок рис. 4.1).

Крапка з комою в кінці кожного рядка після команди блокує виведення на екран результату її виконання.

Розширити межі зміни аргументу чи зменшити крок таблиці можна відповідною зміною масиву значень x . На рис. 4.1 відтворені відомий годограф $\dot{\mu}_{ef}(x)$ та початкові значення таблиці $\dot{\mu}_{ef}(x)$, отримані в середовищі MatLAB за допомогою процедури $teffl(x)$.

Функціональна залежність $\dot{\mu}_{ef} = f(x)$ є досить складною. Розглянемо особливості поліноміальної апроксимації $\dot{\mu}_{ef}(x)$.

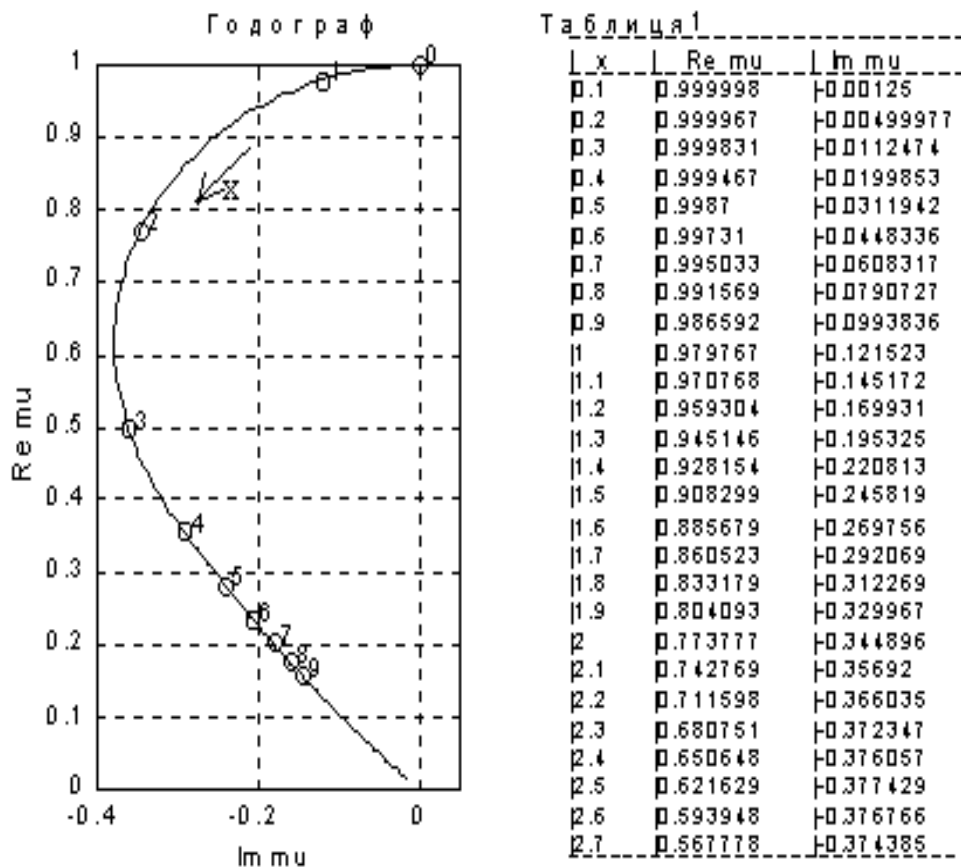


Рис. 4.1. Годограф та таблиця значень ефективної магнітної проникності

На комплексній площині можна виділити деяку область, в межах якої комплексна функція $\dot{\mu}_{ef}(x)$ є аналітичною, отже може бути у всіх точках області представлена єдиним образом у вигляді степеневого ряду з комплексними коефіцієнтами розкладання. Але таке представлення навряд чи буде простішим у

користуванні ніж вихідна функція (4.1). Більш конструктивним шляхом є представлення $\dot{\mu}_{ef}(x)$ у параметричній формі і визначення апроксимуючих поліномів окремо для дійсної та уявної частини $\dot{\mu}_{ef}(x)$

$$\dot{\mu}_{ef}(x) = \text{Re } \dot{\mu}_{ef} + i \text{Im } \dot{\mu}_{ef} \approx \sum_{j=0}^N \alpha_j x^j + i \sum_{j=0}^N \beta_j x^j, \quad (4.2)$$

де α_j, β_j – дійсні коефіцієнти поліномів, N – порядок поліномів.

Система MatLab має зручну процедуру *polyfit* [3, 4] для апроксимації результатів обчислень степеневими рядами. Ця процедура виконується за методом найменших квадратів і повертає значення коефіцієнтів полінома α_j, β_j (4.2), сформованих у вигляді окремих векторів.

Навчально-дослідницька робота студентів

2. Порядок виконання роботи

2.1. Для заданого викладачем діапазону зміни параметра x та кроку його зміни розрахувати значення ефективної магнітної проникності і вивести отримані результати у вигляді таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Розраховані значення ефективної магнітної проникності

№	x	$\text{Re } \dot{\mu}_{ef}(x)$	$-\text{Im } \dot{\mu}_{ef}(x)$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

2.2. Побудувати годограф ефективної магнітної проникності (див. п.1). Звірити отриманий результат з табличними значеннями для $\dot{\mu}_{ef} = f(x)$ (рис. 4.1). Обґрунтувати отриманий результат.

2.3. Вивести графіки дійсної і уявної складових ефективної магнітної проникності як функції параметру x .

Приклад (продовження *LabR4.m*):

```
figure%2
plot(x,Im,'r',x, Re,'g'); xlabel('x'); ylabel('Im meff, Re meff'); grid on;
% 'r' – виведення графіку червоним кольором, 'g' – зеленим.
```

2.4. Побудувати годограф відносної внесеної напруги застосовуючи обчислення $\dot{\mu}_{ef}$:

$$\dot{U}_{\text{вн}}^*(x) = i \cdot \eta \cdot (\mu^* \dot{\mu}_{ef}(x) - 1), \quad (4.3)$$

де η – коефіцієнт заповнення; $\dot{\mu}_{ef}^*$ – відносна магнітна проникність матеріалу, що контролюється ($\dot{\mu}^* = 1$).

Приклад (продовження *LabR4.m*):

```
mx=1; % відносна магнітна проникність
n=0.75; % коефіцієнт заповнення
Uvn=j.*n.*(mx.*meff1(x)-1);
figure%3
plot(real(Uvn),imag(Uvn)); grid on;
```

2.5. Обчислити значення ефективної магнітної проникності $\dot{\mu}_{ef}(x)$ та напруги U ВСП в режимі контролю для циліндричного об'єкту контролю, наприклад прутка. Порядок розрахунку передбачає:

- для заданих викладачем параметрів ОК і частоти струму збудження ВСП розрахувати узагальнений параметр $x = R\sqrt{2\pi f \gamma \mu}$, де R – радіус ОК циліндричної форми, f – частота струму збудження, γ, μ – відповідно питома електропровідність та магнітна проникність матеріалу ОК;
- розрахувати $\dot{\mu}_{ef}$ (див. п.2.1).
- розрахувати вихідну напругу U ВСП в режимі контролю:

$$\dot{U} = E_0 (\dot{U}_{\text{вн}}^* + j), \quad (4.4)$$

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = i\eta (\mu^* \dot{\mu}_{ef} - 1), \quad (4.5)$$

де E_0 – початкова е.р.с. холостого ходу, η – коефіцієнт заповнення. (Значення задає викладач).

Приклад виконання (продовження *LabR4.m*):

```
R=.008:.001:.012;      % діапазон зміни радіуса ОК, м
f=1000;                % частота струму збудження, Гц
g=2.75*10^7;           % питомі електропровідність
m0=4.*pi.*10^(-7);     % магнітна проникність у вакуумі
m=m0.*mx;              % абсолютна магнітна проникність
x1=R.*sqrt(2.*pi.*f.*g.*m); % узагальнений параметр
meff=meff1(x1);        % знаходження ефективної магнітної проникності
Uvn1=j.*n.*(mx.*meff-1); % розрахунок вносимої напруги
figure%4
plot(real(Uvn),imag(Uvn),real(Uvn1),imag(Uvn1),'*');grid on;
E=1;                   % початкова е.р.с. холостого ходу
U=E.*(Uvn1+j)
```

2.6. Отримані результати оформити у вигляді таблиць та графіків.

2.7. Зробити письмові висновки по роботі.

3. Контрольні запитання

1. Дайте визначення та тлумачення поняття «ефективна магнітна проникність».
2. Якими чинниками визначається ефективна магнітна проникність?
3. Намалуйте графік годографу ефективної магнітної проникності.
4. Які відомі вам методи визначення ефективної магнітної проникності?
5. Дайте пояснення командам програми розрахунку ефективної магнітної проникності.

4. Література

1. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, Ковалев А. В. и др.; под ред. В.В. Ключева. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. Середюк, О. Є. Електричний, магнітний та електромагнітний види неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі: навч. посіб. / О. Є. Середюк, О. Б. Барна, О. С. Криницький. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 348 с.

3. Потапов А. И. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько – СПб.: Нестор-История, 2014. – Т.1.: Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок. – 2014. – 480 с.
4. Богомолов В.А. Моделирование систем управления в Simulink : учебное пособие / В.А. Богомолов, О.Г. Гурко, В.І. Клименко, Д.М. Леонтьев, О.М. Красюк – Харків: ХНАДУ, 2018. – 218 с.
5. Лазарев Ю.Ф. Початки програмування у середовищі MatLAB: навч. посібник / Ю.Ф. Лазарев – К:Корнійчук, 1999. – 160с.
6. Giron-Sierra J. M. LinkDigital Signal Processing with Matlab Examples, Volume 1 [electronic resource]: Signals and Data, Filtering, Non-stationary Signals, Modulation / Jose Maria Giron-Sierra. – Singapore: Imprint: Springer, 2017. – 622 p.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ ПРОХІДНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета роботи: вивчення приладів, методики розрахунку і експериментального визначення залежності внесеної електрорушійної сили прохідного зовнішнього трансформаторного вихрострумowego перетворювача (ВСП) від геометричних та електромагнітних параметрів об'єктів контролю (ОК), набуття навичок виявлення і визначення характеру дефектів, а також уміння виконати порівняльний аналіз отриманих розрахунковим і експериментальним способами результатів.

Теоретичні відомості

1. Матеріали та обладнання

Зразки циліндричної форми довжиною $l = 80$ мм та діаметром від 34 мм до 35 мм з інтервалом 0,1 мм. Матеріали ОК – бронза (питома електропровідність $\gamma = 2,75 \cdot 10^7$ См/м), дюралюміній ($\gamma = 4,87 \cdot 10^7$ См/м), (за вказівкою викладача).

Прилади та обладнання:

- генератор сигналів низькочастотний типу ГЗ-36;
- осцилограф С1-79;
- зовнішні прохідні трансформаторні ВСП;
- перемикач двопозиційний;
- вольтметр типу В7-15;
- фазометр типу Ф5131.

За вказівкою викладача визначення напруг, фазових зсувів сигналів та відображення часових діаграм може здійснюватись за допомогою цифрового осцилографа.

2. Фізична сутність контролю

Вихрострумові методи контролю, що реалізуються за допомогою трансформаторних ВСП, ґрунтуються на реєстрації вихідної ЕРС вимірювальної котушки ВСП, яка зазнає впливу вихрових струмів, що наводяться змінним струмом котушки збудження ВСП у електропровідному ОК.

Зовнішній прохідний трансформаторний ВСП має 2 котушки: збуджуючу і вимірювальну. Струм збудження, що протікає в обмотці першої з них, створює

змінне електромагнітне поле, яке породжує електромагнітний потік, який у свою чергу створює в електропровідному матеріалі ОК вихрові струми. Метод, що розглядається, оснований на вимірюванні зворотної дії вихрових струмів, що утворюють своє власне електромагнітне поле, на вимірювальну котушку ВСП. Результатом цієї дії є зміна вихідної ЕРС ВСП (ЕРС вимірювальної котушки), що має комплексний характер. Активна складова вихідної напруги збільшується на величину напруги $\operatorname{Re}\dot{U}_{\text{вн}}$, а індуктивна складова – зменшується на величину напруги $\operatorname{Im}\dot{U}_{\text{вн}}$, де $\dot{U}_{\text{вн}}$ – комплексна внесена напруга. Таким чином, про зміну вихрових струмів в ОК (відповідно і про геометричні параметри ОК та електрофізичні характеристики його матеріалу) можна дізнатись по зміні цих складових напруги на вимірювальній котушці ВСП. Реєструючи напругу $\dot{U}_{\text{вн}}$, можна одержувати інформацію про властивості ОК і його положення у просторі відносно ВСП.

Експериментальна частина

3. Порядок виконання роботи

3.1. Розрахункова частина роботи

3.1.1. Розрахувати ефективний діаметр вимірювальної котушки ВСП:

$$D_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{D_H^2 + D_H D_B + D_B^2}{3}}, \quad (5.1)$$

де D_H – зовнішній діаметр вимірювальної котушки, рівний 40мм, D_B – внутрішній діаметр вимірювальної котушки, рівний 39,1 мм.

3.1.2. Розрахувати ЕРС холостого ходу ВСП:

$$E_0 = \frac{\pi^2 f \mu_0 W_1 W_2 D_{\text{ef}}^2 I}{2l}, \quad (5.2)$$

де f – частота струму збудження (задається викладачем), W_1 та W_2 – кількість витків відповідно збуджуючої і вимірювальної котушок ВСП, I – струм збудження (задається викладачем), l – довжина обмотки збудження, рівна 70 мм,

$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнітна стала.

3.1.3. Для кожного з ОК із заданої партії, розрахувати узагальнений параметр

$$\beta_0 = \frac{D}{2} \sqrt{2\pi f \mu_0 \gamma}, \quad (5.3)$$

де γ – питома електропровідність матеріалу ОК.

3.1.4. Визначити табличним методом для кожного із значень узагальненого параметра складові ефективної магнітної проникності $\text{Re} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)$ та $\text{Im} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)$. У випадку розбіжності розрахункових і табличних значень β_0 , застосувати інтерполяційну формулу виду:

$$X = X_{\text{MIN}} \pm \frac{\Delta\beta_0 (\Delta X)_{\text{MAX}}}{(\Delta\beta_0)_{\text{MAX}}}, \quad (5.4)$$

де X – значення складових ефективної магнітної проникності $\text{Re} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)$ або $\text{Im} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)$ для розрахованого значення β_0 ; X_{min} – нижня межа (найближче менше за $\text{Re} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)$ або $\text{Im} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)$ табличне значення); $\Delta X_{\text{max}} = X_{\text{max}} - X_{\text{min}}$ – різниця між верхньою і нижньою межами складових $\dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)$; $\Delta\beta_0 = \beta_0 - \beta_{0\text{min}}$ – різниця між розрахунковим значенням узагальненого параметра і його найближчим меншим табличним значенням; $(\Delta\beta_0)_{\text{max}} = \beta_{\text{max}} - \beta_{\text{min}}$ – різниця між верхньою і нижньою межами табличних значень узагальненого параметра, $\beta_0 \in (\beta_{\text{min}}, \beta_{\text{max}})$

3.1.5. Результати розрахунків за п.п. 3.1.3. та 3.1.4. звести в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1. Результати розрахунків

$D, \text{мм}$	β_0	$\text{Re} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)$	$\text{Im} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)$
34,0			
.			
35,0			

3.1.6. Для кожного ОК, що входить в партію, розрахувати дійсну (активну) і уявну (реактивну) складові внесеної напруги ВСП:

$$\text{Re} \dot{U}_{\text{BH}} = \frac{2\pi^3 f W_1 W_2 D^2 I}{l} \text{Im} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0) 10^{-7}; \quad (5.5)$$

$$\text{Im} \dot{U}_{\text{BH}} = \frac{2\pi^3 f W_1 W_2 D^2 I}{l} (1 - \text{Re} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0)) 10^{-7}; \quad (5.6)$$

а також їх нормовані відносні значення:

$$\operatorname{Re} \dot{U}_{\text{BH}}^* = \frac{\operatorname{Re} \dot{U}_{\text{BH}}}{E_0} = \eta \operatorname{Im} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0); \quad (5.7)$$

$$\operatorname{Im} \dot{U}_{\text{BH}}^* = \frac{\operatorname{Im} \dot{U}_{\text{BH}}}{E_0} = \eta (\operatorname{Re} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0) - 1); \quad (5.8)$$

де $\eta = \frac{D^2}{D_{\text{ef}}^2}$ – коефіцієнт заповнення.

3.1.7. Результати розрахунку за п.3.1.6 звести в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2. Результати розрахунків

$D, \text{мм}$	$\operatorname{Re} \dot{U}_{\text{BH}}, \text{В}$	$\operatorname{Im} \dot{U}_{\text{BH}}, \text{В}$	$\operatorname{Re} \dot{U}_{\text{BH}}^*, \text{В}$	$\operatorname{Im} \dot{U}_{\text{BH}}^*, \text{В}$
34,0				
.				
35,0				

3.1.8. Для ОК діаметром $D = 35$ мм розрахувати чутливість ВСП до зміни діаметра ОК за активною і реактивною складовими внесеної ЕРС:

$$S_{\operatorname{Re} \dot{U}_{\%}}^D = \frac{4\pi^5 f^2 W_1 W_2 D^3 \gamma I}{l} ((\operatorname{Re} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0))^2 - (\operatorname{Im} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta))^2) 10^{-14} \left[\frac{mB}{mm} \right] \quad (5.9)$$

$$S_{\operatorname{Im} \dot{U}_{\%}}^D = -\frac{8\pi^5 f^2 W_1 W_2 D^3 \gamma I}{l} \operatorname{Re} \dot{\mu}_{\text{ef}}(\beta_0) \cdot \operatorname{Im} \dot{\mu}_{\text{ef}} 10^{-14} \left[\frac{mB}{mm} \right] \quad (5.10)$$

3.2. Налаштування експериментальної установки

Зібрати схему експерименту (рис. 5.1). При цьому слід використовувати гніздо «Вихід 1 генератора». Підготувати генератор до роботи, для чого:

- перемикачі «Hz» і «МНОЖНИК» встановити в положення, відповідні заданій частоті (п. 5.1.2.);
- ручку «Рег. Виходу» встановити в крайнє ліве положення, обертаючи її проти годинникової стрілки;
- перемикач «Ослаблення dB» встановити в положення «1»;
- решта елементів управління може знаходитися в довільному положенні;

д) підключити генератор до електричної мережі і встановити тумблер «Сеть» в положенні «1»; при цьому повинна засвітитись лампочка індикатора включення;

е) прогріти генератор до початку роботи впродовж 15-20 хв.

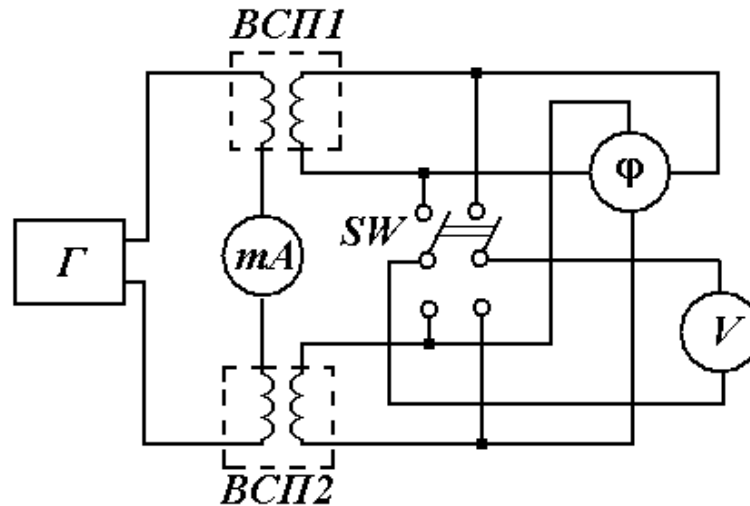


Рис. 5.1. Схема експериментальної установки: Γ – генератор, mA – міліамперметр, V – вольтметр, ВСП – вихростромовий перетворювач, SW – комутатор, φ – фазометр

Підготувати фазометр до роботи, для чого:

а) встановити перемикачі в положення: «Усереднювання» – «Срдн», «Рівні сигналів» – «Авт», «Режим роботи» – «Слд», «Частота, Hz» – в положення відповідне заданій частоті;

б) під'єднати фазометр до електричної мережі і натисненням кнопки «Сеть» включити його живлення.

Підготувати вольтметр до роботи, для чого:

а) підключити прилад до електричної мережі;

б) натиснути кнопку «Сеть»; при цьому повинен засвітитися індикатор «V» або «mV»;

в) для встановлення робочого режиму витримати прилад включеним в мережу живлення протягом 15 хв.

3.3. Підготовка до експерименту

3.3.1. Обертаючи ручку генератора «Рег. Виходу» за годинниковою стрілкою, встановити в ланцюзі обмоток збудження ВСП за показаннями міліамперметра (mA) значення струму, задане викладачем (п. 3.1.2). З моменту підключення вхідних сигналів і до видачі результату вимірювання фазометр

проходить стан «Підготовка» і стан «Вимірювання». Ці стани відображаються індикаторами «Підгот.» і «Вимір». Знімати значення фазометра можна тільки при значенні індикатора «Відлік». Встановити ручками «UA і «UB» фазометра» покажчики індикаторів «Рівні сигналів» на відмітку $75 \div 100$ і контролювати ці значення в процесі вимірювання. Встановити на цифровому індикаторі фазометра нульове значення натисканням кнопки «Уст.0».

3.3.2. Провести вимірювання ЕРС холостого ходу, переконавшись заздалегідь в тому, що обидва ВСП мають ідентичні вихідні параметри (тобто ЕРС холостого ходу ВСП1 і ВСП2 рівні один одному). Перемикач П встановити потім в таке положення, при якому вольтметр був підключений до ВСП, призначеному для роботи в режимі контролю. Встановлюючи по черзі ОК в ВСП, призначений для роботи в режимі контролю, провести за допомогою вольтметра і фазометра вимірювання вихідної напруги ВСП і зсуву фаз між цією напругою і ЕРС холостого ходу E_0 (рис. 5.2).

Результати вимірювань звести в таблицю 5.3.

3.3.3. За результатами вимірювань U та φ розрахувати складові вихідної напруги ВСП $\text{Re} \dot{U}$ та $\text{Im} \dot{U}$ (рис. 5.2).

3.3.4. Розрахувати, виходячи з результатів п.п. 3.3.2, 3.3.3 і рис. 5.2, складові вихідної напруги ВСП $\text{Re} \dot{U}_{\text{вн}}$ і $\text{Im} \dot{U}_{\text{вн}}$ (складові відносних значень внесеної вихідної напруги). Результати розрахунків п.п. 3.3.3 та 3.3.4 звести в таблицю 5.4.

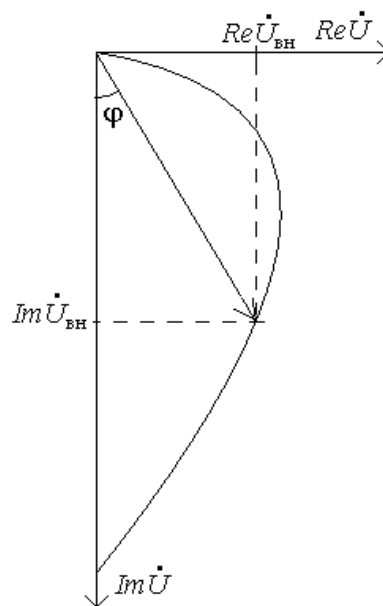


Рис. 5.2 Годограф відносних внесених напруг $\dot{U}_{\text{вн}}$ прохідного трансформаторного ВСП

Таблиця 5.3. Результати вимірювань

$D, \text{мм}$	$U, \text{В}$	$\varphi, \text{град}$	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$
34,0				
34,1				
34,2				
34,3				
34,4				
34,5				
34,6				
34,7				
34,8				
34,9				
35,0				

3.3.5. За результатами експерименту розрахувати чутливість ВСП до зміни діаметра ОК на 0,1 мм, використовуючи формули:

$$S_{\text{Re}\dot{U}_{\%}}^D = \frac{(\text{Re}\dot{U}_{\%}')_D - (\text{Re}\dot{U}_{\%}')_{D-0,1}}{0,1}; \quad (5.11)$$

$$S_{\text{Im}\dot{U}_{\%}}^D = \frac{(\text{Im}\dot{U}_{\%}')_D - (\text{Im}\dot{U}_{\%}')_{D-0,1}}{0,1}; \quad (5.12)$$

і порівняти з чутливістю, отриманою розрахунковим шляхом.

Таблиця 5.4. Розрахунок складових відносних значень внесеної вихідної напруги

$D, \text{мм}$	$\text{Re}\dot{U}, \text{В}$	$\text{Im}\dot{U}, \text{В}$	$\text{Re}\dot{U}_{\text{вн}}, \text{В}$	$\text{Im}\dot{U}_{\text{вн}}, \text{В}$	$\text{Re}\dot{U}_{\text{вн.н.}}^*, \text{В}$	$\text{Im}\dot{U}_{\text{вн.н.}}^*, \text{В}$
34,0						
34,1						
34,2						
34,3						
34,4						
34,5						
34,6						
34,7						
34,8						
34,9						
35,0						

Виконайте порівняльний аналіз результатів, отриманих розрахунковим і експериментальним шляхом, згідно пп. 3.3.6-3.3.8.

3.3.6. Приймаючи розраховані значення відносних внесених напруг ВСП за дійсні, розрахувати відносні похибки вимірювання цих параметрів:

$$\delta_{\text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}\%} = \frac{(\text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}^*)_e - (\text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}^*)_p}{(\text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}^*)_p} 100\%; \quad (5.13)$$

$$\delta_{\text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}\%} = \frac{(\text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}^*)_e - (\text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}^*)_p}{(\text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}^*)_p} 100\%; \quad (5.14)$$

де $(\text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}^*)_e$ і $(\text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}^*)_e$ – експериментальні значення складових відносної вихідної напруги ВСП (п. 3.3.4) і $\text{Re}\dot{U}$ і $\text{Im}\dot{U}$, розрахункові значення цих складових (п. 3.1.7). Результати звести в таблицю 5.5.

3.3.7. За результатами розрахунку і експерименту побудувати в одній координатній системі графіки функцій:

$$\text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}^* = F(D) \text{ або } \text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}^* = F(\gamma), \quad (5.15)$$

$$\text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}^* = F(D) \text{ або } \text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}^* = F(\gamma). \quad (5.16)$$

Таблиця 5.5. Розрахунок відносних похибок вимірювання

$D, \text{ мм}$	Розрахункові		Експериментальні		$\gamma_{\text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}\%}, \%$	$\gamma_{\text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}\%}, \%$
	$\text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}$	$\text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}$	$\text{Re}\dot{U}_{\text{BH}}^*$	$\text{Im}\dot{U}_{\text{BH}}^*$		
34,0						
34,1						
34,2						
34,3						
34,4						
34,5						
34,6						
34,7						
34,8						
34,9						
35,0						

3.3.8. Побудувати в одній координатній системі годографи відносних значень вихідних напруг ВСП, отриманих експериментальним і розрахунковим шляхом, за даними попередньої таблиці. Обґрунтувати розбіжності між результатами, отриманими експериментальним і розрахунковим шляхом.

3.3.9. Зробити висновки по роботі.

4. Зміст звіту

1. Опис принципу роботи зовнішнього прохідного трансформаторного ВСП.
2. Методика проведення експерименту.

3. Методика розрахунку узагальненого параметра, складових ефективної магнітної проникності, ЕРС холостого ходу, складових вихідної внесеної напруги ВСП і їх відносних значень.

4. Розрахункові і експериментальні значення ЕРС холостого ходу.

5. Таблиці з результатами розрахунків і експерименту.

6. Результати розрахункових і експериментальних значень чутливості ВСП.

7. Графіки функціональної залежності, побудовані за результатами розрахунків і експерименту (див. формули 15 та 16)

8. Годографи відносних внесених напруг ВСП, побудовані за наслідками розрахунків і експерименту $\text{Re}\dot{U}_{\text{вн}}^* = F(\text{Im}\dot{U}_{\text{вн}}^*)$.

9. Аналіз отриманих результатів і висновки по роботі.

5. Контрольні запитання

1. В чому полягає фізична сутність вихрострумового методу контролю електромагнітних і геометричних параметрів ОК циліндричної форми?

2. Поясніть дію складових системи: «об'єкт контролю – прохідний трансформаторний ВСП».

3. Дайте пояснення сутності поняття «ефективна магнітна проникність».

4. Побудуйте та дайте пояснення годографу ефективної магнітної проникності.

5. Як змінюється відносна внесена напруга прохідного ВСП у випадку: а) зменшення (збільшення) радіуса прутка б) зменшення (збільшення) електропровідності матеріалу?

6. Які чинники впливають на чутливість прохідних ВСП до зміни радіуса прутка та його електропровідності?

6. Література

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, Ковалев А. В. и др.; под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.

2. Потапов А. И. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько – СПб.: Нестор-История, 2014. – Т.1.: Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок. – 2014. – 480 с.

3. Потапов А. И. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. / А.И. Потапов, В.А. Сясько – СПб.: Нестор-История, 2014. – Т. 2 : Электромагнитные и магнитные методы дефектоскопии и контроля свойств материалов : научное справочно-методическое пособие. – 2015. – 440 с.
4. Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 5, Electromagnetic Testing / Satish S Udpa (technical editor), Patrick O'Moore (editor). – ASNT, 2004. – 536 p.
5. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник. Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т. Назарчука. – Львів: Фізико-механічний ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.
6. Середюк, О. Є. Електричний, магнітний та електромагнітний види неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі: навч. посіб. / О. Є. Середюк, О. Б. Барна, О. С. Криницький. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 348 с.
7. Kojima F., Takagi T., Udpa S.S., Pávó J. Electromagnetic Nondestructive Evaluation. – Vol. 23: Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics Edited. – 2002, 320 pp.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКЦІЙНОГО СТРУМУ НАКЛАДНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Мета роботи: ознайомлення з програмним пакетом Comsol Multiphysics і його можливостями моделювання електромагнітних полів, отримання базових навичок роботи з ним. Створення та вивчення моделі процесу розповсюдження електромагнітного поля в об'єкті контролю.

Теоретичні відомості

1. Опис досліджуваної моделі

Магнітне поле виникає навколо провідника за умови, що в ньому проходить електричний струм. В загальному випадку магнітне поле існує навколо будь-якого провідника зі струмом, тобто навколо рухомих електричних зарядів. Навколо нерухомих електричних зарядів існує тільки електричне поле, але за умови руху зарядів (електричного струму) виникає водночас і електричне, і магнітне поле. Через це магнітне поле вважається окремим проявом електромагнітного поля [1].

Змінний в часі електричний струм є джерелом змінного магнітного поля, яке в свою чергу є джерелом виникнення наведеного струму в сусідніх об'єктах з провідних матеріалів. Такі наведені струми носять назву *вихрових струмів*. Дана лабораторна робота присвячена моделюванню явища виникнення змінного гармонійного поля шляхом аналізу перехідного процесу та дослідження вихрових струмів, що виникають внаслідок ввімкнення джерела змінного струму.

Досліджувана модель представляє собою два витки обмотки розміщені над мідною пластиною (рис. 6.1). Всі елементи моделі знаходяться в повітрі. Різницю потенціалів в обмотках забезпечує зовнішнє джерело. Для отримання та оцінювання щільності повного струму в обмотках в моделі під час виконання лабораторної роботи передбачено врахування індукованого струму. Результатами моделювання є демонстрація розподілу щільності повного струму вздовж товщини мідної пластини, тобто явище так званого «*скін-ефекту*».

Для завдань моделювання використовують квазістаціонарне змінне електромагнітне поле, що представляє собою наближений спосіб опису

електромагнітного поля, за якого можна знехтувати струмом зміщення в системі рівнянь Максвелла. В такому випадку вираз магнітного потенціалу A матиме вигляд:

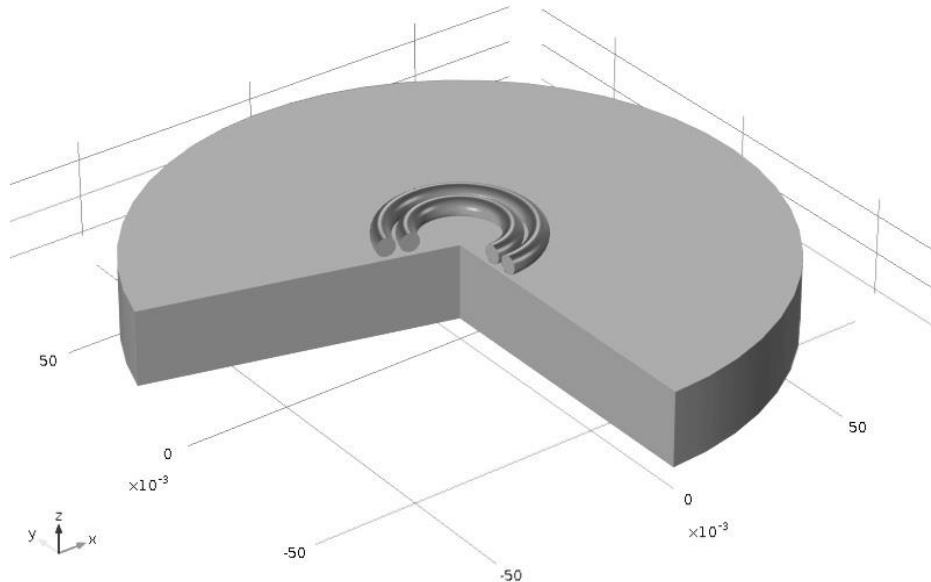


Рис. 6.1. Ілюстрація взаємного розташування елементів моделі

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A) = \sigma \frac{V_{coil}}{2\pi r} \quad (6.1)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму, μ_r – відносна магнітна проникність, σ – електропровідність, і V_{coil} – напруга на одному витку котушки. У випадку гармонічних сигналів рівняння (6.1) зводиться до наступного:

$$j\omega\sigma A + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A) = \sigma \frac{V_{coil}}{2\pi r} \quad (6.2)$$

Загальна сила електромагнітного поля, що діє на область простору Ω , може бути отримана шляхом інтегрування тензора напруги з рівнянь Максвелла по обмеженій області простору $\partial\Omega$:

$$F = \int_{\partial\Omega} T n dS \quad (6.3)$$


Використовуючи вбудовані функції програми Comsol Multiphysics в процесі обчислення сили електромагнітного поля відбудеться визначення інтегралу автоматично уздовж меж потрібної області з врахуванням симетричної геометрії задачі. Отримана сила електромагнітного поля буде представлена як результат опрацювання моделі у вигляді глобальної змінної.

Навчально-дослідницька робота студентів


2. Порядок виконання роботи

Робота проводиться на базі програмного пакету Comsol Multiphysics версії 4.3 (ярлик на «Робочому столі» комп'ютера)

1. Вибір початкових налаштувань моделювання:

1.1 У вікні вибору налаштувань моделі Model Wizard обрати розмірність простору 2D axisymmetric і натиснути «Далі» – 

1.2 Обрати фізику моделі AC/DC>Magnetic Fields (mf). Натиснути «Далі»

1.3 Обрати область аналізу Preset Studies>Frequency Domain. Натиснути Finish – 

2. Створення геометрії моделі:

2.1 У вікні Model Builder на елементі Model 1 > Geometry 1 натиснути праву кнопку миші і обрати **Square**. Створюємо середовище, де будуть розраховуватись ОК та ВСП.

2.2 У вікні налаштувань Square вказати в полі Size length розміри – 0.1 м. Координати положення квадрату залишити без змін (рис. 6.2). Натиснути Build Selected.

2.3 У вікні Model Builder на елементі Model 1 > Geometry 1 натиснути праву кнопку миші і обрати **Rectangle** (OK).

2.4 У вікні налаштувань Rectangle вказати розміри прямокутника: довжина 0.08 м, висота 0.02 м, координати нижнього лівого кута встановити 0.025 (рис. 6.3). Натиснути Build Selected.

2.5 У вікні Model Builder на елементі Model 1 > Geometry 1 натиснути праву кнопку миші і обрати **Circle** (виток котушки ВСП).

2.6 У вікні налаштувань Circle вказати розміри кола: радіус 0.0025 м, координати центра встановити $r=0.0125$, $z=0.0485$ (рис. 6.4). Таким чином проміжок між ОК та накладним ВСП становитиме 0,001 м. Натиснути Build Selected.

2.7 У вікні Model Builder на елементі Model 1 > Geometry 1 натиснути праву кнопку миші і обрати ще один **Circle** (другий виток котушки ВСП).

2.8 У вікні налаштувань Circle вказати розміри кола: радіус 0,0025 м, координати центра встановити $r=0,0185$, $z=0,0485$ (за аналогією до випадку, представленою на рис. 6.4). Натиснути Build All.

На цьому побудова геометрії моделі завершена, результат приведено на рис. 6.5.

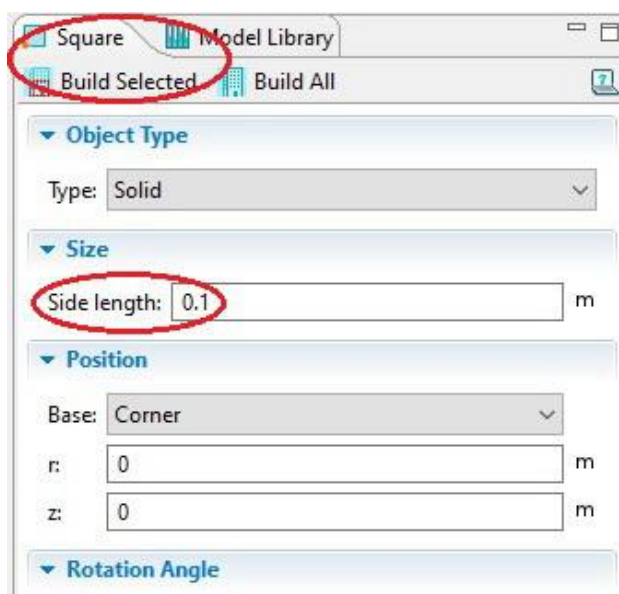


Рис. 6.2. Вікно налаштувань геометрії об'єкта Square

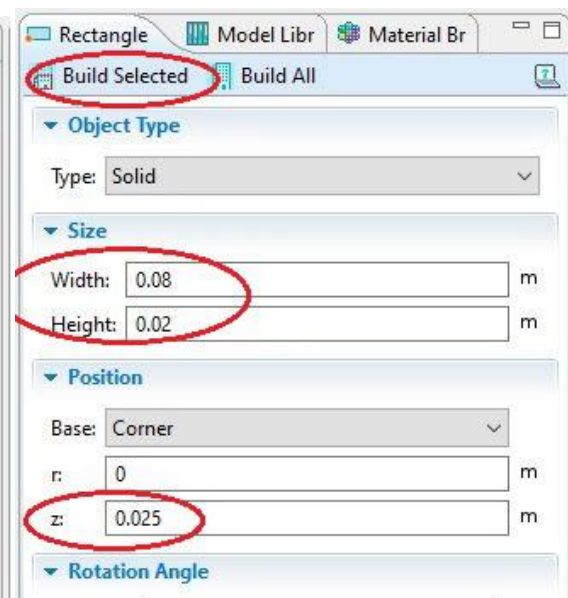


Рис. 6.3. Вікно налаштувань геометрії об'єкта Rectangle

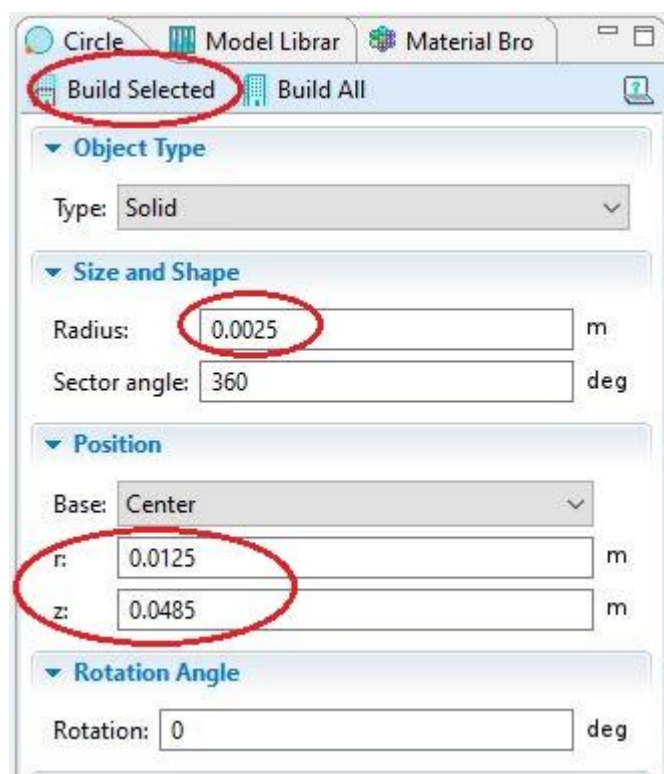


Рис. 6.4 Вікно налаштувань геометрії об'єкта Circle

3. Вибір матеріалів ОК та дефекту:

3.1 У вікні Model Builder на Model 1 > Materials натиснути праву клавішу миші і обрати бібліотеку матеріалів – Open Material Browser.

3.2 У вікні налаштувань Material Browser вибрати Built in > Air, тобто виділити лівою кн. миші матеріал, і додати його до налаштувань моделі (рис. 6.6).

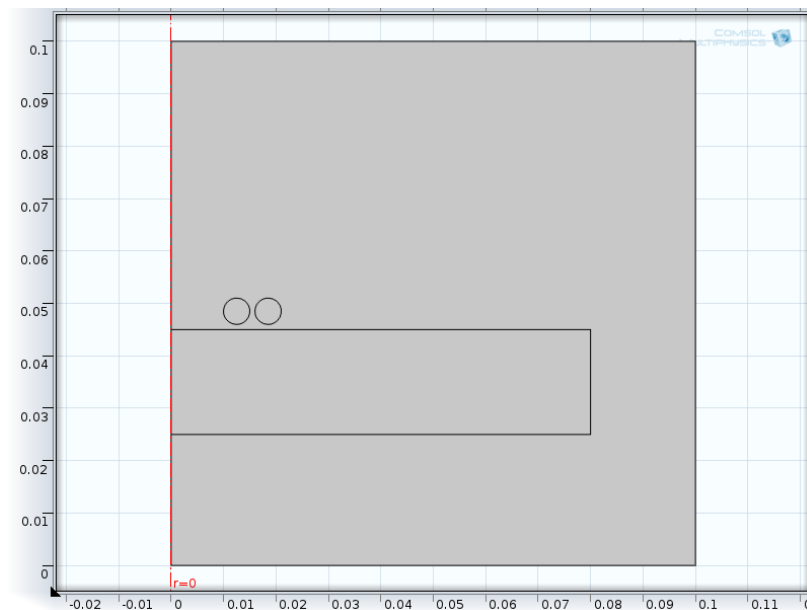


Рис. 6.5. Геометрія моделі

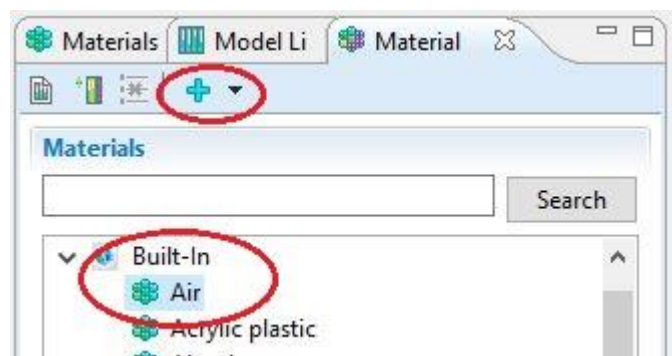




Рис. 6.6. Вікно бібліотеки матеріалів


3.3 Виконати дії аналогічні в п. 3.2 для додавання в модель матеріалу мідь (Built in > Copper).

3.4 У вікні налаштувань матеріалу Copper необхідно вказати елементи геометрії, що йому відповідають – це ОК та ВСП. Для цього необхідно скористатися кнопкою вставки  та у відкритому вікні вписати номери елементів 2,3,4 і натиснути ОК (рис. 6.7). Для матеріалу повітря Air така процедура відбудеться автоматично (методом виключення).

4. Налаштування параметрів магнітного поля:

4.1 У вікні Model Builder на Model 1 > Magnetic fields натиснути праву кнопку миші і обрати Single-Turn Coil (катушка ВСП).

4.2 У вікні налаштувань Single-Turn Coil в полі елементів Boundary Selection додати елементи, що відповідають катушкам ВСП – у вікні відображення моделі виділити лівою кн. миші виток і натиснути  (або ж натиснути кнопку вставки

елемента , у відкритому вікні вставки вписати його номер – 3 і натиснути ОК). Таку саму операцію необхідно повторити для іншого витка (номер 4).

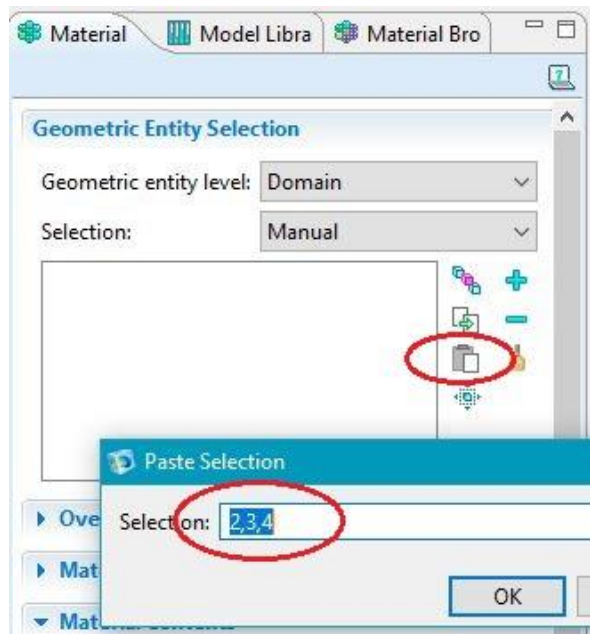


Рис. 6.7. Вибір елементів моделі для матеріалу Copper

4.3 У вікні налаштувань Single-Turn Coil в розділі Single-Turn Coil в полі Coil excitation обрати Voltage та в полі Coil voltage встановити значення для V_{coil} рівним $1e-4$ В (рис. 6.8). Ця напруга буде встановлена для обох витків ВСП.

4.5 Для обчислення сили, що діє на пластину (ОК) в магнітному полі, у вікні Model Builder на Model 1 > Magnetic fields натиснути праву клавішу миші і обрати Force Calculation.

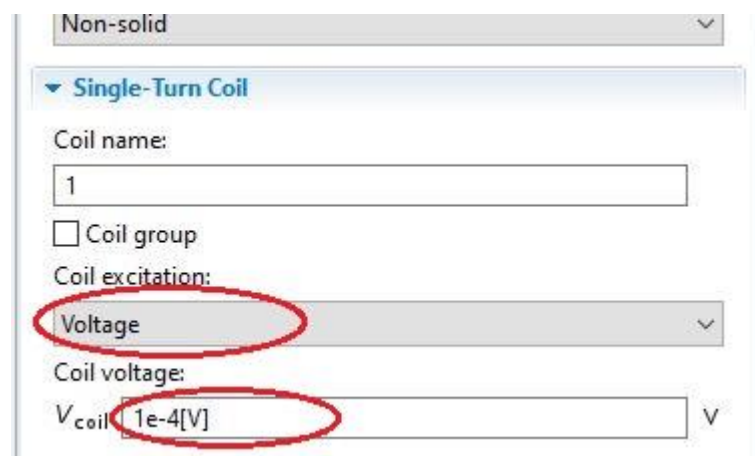




Рис. 6.8. Налаштування параметрів витка

4.6 У вікні налаштувань Force Calculation в полі елементів Boundary Selection додати елемент, що відповідає пластині (ОК) – у вікні відображення моделі

виділити лівою кн. миші виток і натиснути  (або ж натиснути кнопку вставки елемента , у відкритому вікні вставки вписати її номер – 2 і натиснути OK).

4.7 У вікні налаштувань Force Calculation в розділі Force Calculation в полі Force name вписати plate.

5. Параметри моделювання:

5.1 У вікні Model Builder обрати Study 1 > Step 1: Frequency Domain. У вікні налаштувань в полі Frequencies вказати частоту електромагнітного поля в процесі моделювання – 10[Hz],100[Hz],300[Hz].

5.2 У вікні Model Builder обрати Study 1, в якому необхідно очистити прапорець напроти Generate default plots та натиснути Compute .

6. Оброблення та візуалізація результатів:

6.1 У вікні Model Builder на Results натиснути праву клавішу миші і обрати 2D Plot Group.

6.2 У вікні Model Builder на Results > 2D Plot Group натиснути праву клавішу миші і обрати Surface.

6.3 У вікні налаштувань Surface в меню Expression натиснути Replace Expression (рис. 6.9). З випадаючого меню обрати:
Magnetic Fields >

Currents and charge >

Induced current density >

Induced current density, phi component (mf.Jiphi).

Натиснути Plot (рис 6.9.).

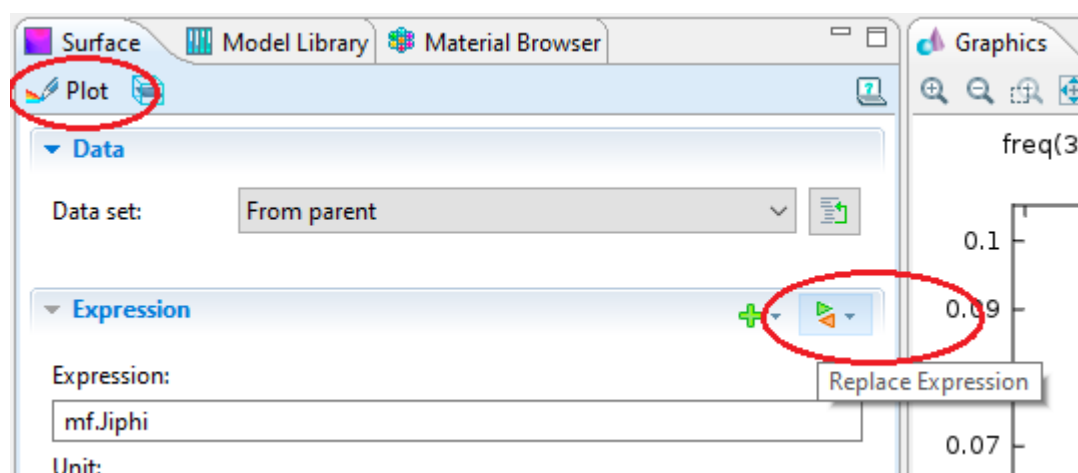


Рис. 6.9. Вікно налаштувань меню Surface


6.4 Перейдіть до вікна налаштувань Model Builder > Results > 2D Plot Group. Змінюючи поле Parameter value (freq), тобто змінюючи частоту збуджувального

сигналу, можна відобразити проникнення магнітного поля в ОК на різній частоті (щоразу після вибору частоти натискайте Plot).

6.5 З метою візуалізації густини магнітного потоку у вікні Model Builder на Results > 2D Plot Group натиснути праву клавішу миші і обрати Contour. У вікні налаштувань Contour в меню Expression в полі Expression прописати вираз $A_{phi} \cdot r$. Перейдіть до вікна налаштувань Model Builder > Results > 2D Plot Group та змініть значення в полі Parameter value (freq).

7. Часовий аналіз моделі:

7.1 У вікні Model Builder на назві файлу з даною моделлю name.mph натиснути праву клавішу миші і обрати Add Study.

7.2 У вікні налаштувань нового дослідження обрати Preset Studies > Time Dependent. Натиснути Finish - 

7.3 У вікні Model Builder обрати Study 2 > Step 1: Time Dependent. У вікні налаштувань в полі Times вказати час моделювання 0, $10^{(range(-4,1/3,-1))}$. Ввімкнути прапорець Relative tolerance та встановити для нього значення 0.001 (рис. 6.10).

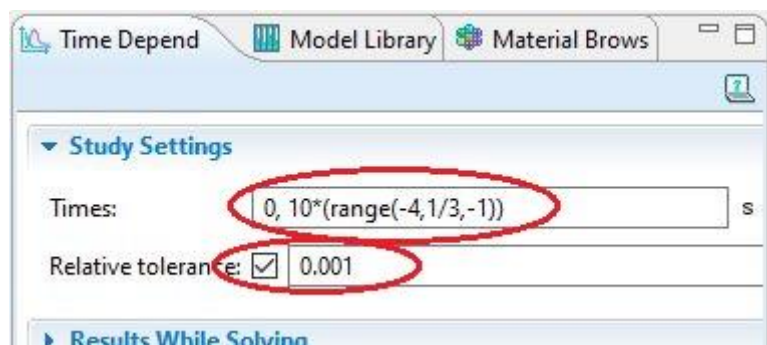


Рис. 6.10. Вікно налаштувань для часового аналізу моделі

7.4 У вікні Model Builder обрати Study 2, в якому необхідно очистити прапорець напроти Generate default plots та натиснути Compute .

7.5 У вікні Model Builder на Results натиснути праву клавішу миші і обрати 2D Plot Group.

7.6 У вікні налаштувань 2D Plot Group в полі Data set обрати Solution 2 та в полі Time з випадного меню обрати значення 0,002154.

7.7 У вікні Model Builder на Results > 2D Plot Group 2 натиснути праву клавішу миші і обрати Surface.

7.8 У вікні налаштувань Surface в меню Expression натиснути Replace Expression (рис. 6.9). З випадного меню обрати:

Magnetic Fields >

Currents and charge >

Induced current density >

Induced current density, phi component (mf.Jiphi).

7.9 У вікні Model Builder на Results > 2D Plot Group 2 натиснути праву клавішу миші і обрати Arrow Surface.

7.10 У вікні налаштувань Arrow Surface в меню Arrow Positioning: знайти r grid points та в полі Points вписати «50»; знайти z grid points та в полі Points вписати «50». В меню Coloring and Style того ж вікна налаштувань в підменю Color обрати «білий» (White, для контрасту).

7.11 Натисніть Plot.

Для побудови графіку зміни електромагнітної сили в часі по вертикальній координаті виконаємо наступні дії:

7.12 У вікні Model Builder на Results натиснути праву клавішу миші і обрати 1D Plot Group.

7.13 У вікні налаштувань 2D Plot Group в полі Data set обрати Solution 2 та в меню Legend в полі Position з випадного меню обрати Lower right.

7.14 У вікні Model Builder на Results > 1D Plot Group 3 натиснути праву клавішу миші і обрати Global.

7.15 У вікні налаштувань Global в меню y-Axis Data натиснути Replace Expression (аналогічно рис. 6.9). З випадного меню обрати:

Magnetic Fields >

Mechanical >

Electromagnetic force >

Electromagnetic force, z component (mf.Forcez_plate)

7.16 Натисніть Plot.

3. Зміст звіту

Звіт має містити графіки, отримані за результатами дій, описаних в п. 3 протоколу та аналіз отриманих результатів. Кожен графік має містити всі необхідні позначення і підписи та супроводжуватись коротким описом явищ та ефектів, відомих з лекційного матеріалу.

4. Контрольні запитання

1. Назвіть властивості та особливості електромагнітного поля.
2. Які величини характеризують електромагнітне поле?
3. Проаналізуйте вплив зміни частоти на глибину проникнення електромагнітного поля в середину ОК з електропровідних матеріалів.
4. Поясніть визначення електромагнітного потоку.
5. Дайте визначення електромагнітної сили.

5. Література

1. Головки М.В. Фізика / М.В. Головки, Л.В. Непорожня, В.С. Коваль, Ю.С. Мельник, В.В. Сіпій. – Київ: Видавничий дім «Сам», 2017. – 322 с.
2. Induction Currents from Circular Coilshttps [Електронний ресурс] // Comsol Inc. – Режим доступу: <https://www.comsol.ru/model/induction-currents-from-circular-coils-124>. – (дата звернення: 10.04.2021). – Назва з екрану.
3. Куц Ю.В. Магнітний неруйнівний контроль. Навчальний посібник. / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко, В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко – Київ: НТУУ «КПІ». – 2012. – 139 с.
4. Allanore Antoine. Materials Processing Fundamentals 2017 [Electronic resource] / Allanore Antoine, Lambotte Guillaume, Lee Jonghyun. – Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2017. – 146 p.